

SÉRIE A, N° 206

N° D'ORDRE :

230

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

M. G. Y. ZARA, S. B., M. S. Ae.

1^{re} THÈSE. — ÉTUDE DU COMPAS MAGNÉTIQUE A INDUCTION ET DU
PERFECTIONNEMENT DE CET APPAREIL.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 12^e Juin 1930, devant la Commission d'Examen.

MM. Ch. MAURAIN . . .	Président
L. DUNOYER . . .	} Examinateurs
H. LABROUSTE . . .	

PARIS (V°)

LES PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

49, Boulevard Saint-Michel, 49

19/30

SÉRIE A, N° 206

N° D'ORDRE :

230

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

M. G. Y. ZARA, S. B., M. S. Ae.

1^{re} THÈSE. — ÉTUDE DU COMPAS MAGNÉTIQUE A INDUCTION ET DU
PERFECTIONNEMENT DE CET APPAREIL.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le Juin 1930, devant la Commission d'Examen.

MM. CH. MAURAIN . . .	Président
L. DUNOYER . . .	} Examinateurs
H. LABROUSTE . . .	

PARIS (V^e)

LES PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

49, Boulevard Saint-Michel, 49

—
1930

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du globe.

Doyens honoraires P. APPELL, M. MOLLIARD.

Prof. honoraires { A. JOANNIS.
H. LE CHATELIER.
H. LEBESGUE.
A. FERNBACH.
A. LEDUC.
E. HÉROUARD.

Emile PICARD . . . Analyse supérieure et algèbre supérieure.
G. KÖNIGS Mécanique physique et expérimentale.
E. GOURSAT Calcul différentiel et calcul intégral.
P. JANET Electrotechnique générale.
F. WALLERANT . . . Minéralogie
P. PAINLEVÉ . . . Mécanique analytique et mécanique céleste.
Gabriel BERTRAND . . Chimie biologique.
M^{me} P. CURIE . . . Physique générale et radioactivité.
M. CAULLERY . . . Zoologie (Evolution des êtres organisés).
G. URBAIN Chimie générale.
Emile BOREL Calcul des probabilités et Physique mathém.
L. MARCHIS Aviation.
Jean PERRIN Chimie physique.
Rémy PERRIER . . . Zoologie (Enseignement P. C. N.).
H. ABRAHAM Physique.
M. MOLLIARD . . . Physiologie végétale.
E. CARTAN Géométrie supérieure.
L. LAPICQUE . . . Physiologie générale.
E. VESSIOT Théorie des fonctions et théories des trans-
formations.

Professeurs . . . A. COTTON . . . Physique générale.
J. DRACH Application de l'analyse à la géométrie.
Charles FABRY . . . Physique.
Charles PÉREZ . . . Zoologie.
Léon BERTRAND . . Géologie structurale et géologie appliquée.
R. LESPIEAU . . . Théories chimiques.
E. RABAUD Biologie expérimentale.
P. PORTIER Physiologie comparée.
E. BLAISE Chimie organique.
P.-A. DANGEARD . . Botanique.
Paul MONTEL . . . Mécanique rationnelle.
P. WINTREBERT . . Anatomie et histologie comparées.
O. DUBOSQ Biologie maritime.
G. JULIA Mathématiques générales.
A. MAILHE Etude des combustibles.
L. LUTAUD Géographie physique et géologie dynamique.
Eugène BLOCH . . . Physique théorique et physique céleste.
Henri VILLAT . . . Mécanique des fluides et applications.
Ch. JACOB Géologie.
P. PASCAL Chimie minérale.
Léon BRILLOUIN . . Théories physiques.
V. AUGER Chimie appliquée.
E. ESCLANGON . . . Astronomie.

E. PÉCHARD . . . Chimie (Enseigt P. C. N.).
M. GUICHARD . . . Chimie minérale.
A. GUILLET . . . Physique.
C. MAUGUIN . . . Minéralogie.
L. BLARINGHEM . . Botanique.
A. MICHEL-LÉVY . . Pétrographie.
A. DEREIMS . . . Géologie
A. DENJOY Calcul différé. et intégral.
H. BÉNARD . . . Physique (P. C. N.).
E. DARMOIS . . . Physique.
G. BRUHAT . . . Physique.
H. MOUTON . . . Chimie physique.
L. JOLEAUD . . . Paléontologie.
M. JAVILLIER . . . Chimie biologique.
A. DUFOUR . . . Physique (P. C. N.).
F. PICARD . . . Zoologie (Evolution des
êtres organisés).
ROBERT-LÉVY . . . Zoologie.
L. DUNOYER . . . Optique appliquée.
A. GUILLIERMOND . Botanique (P. C. N.).
A. DEBIERNE . . . Radioactivité.
M. FRÉCHET . . . Calcul des Probabilités et
Physique mathémat.

Secrétaire A. PACAUD.



A MONSIEUR CHARLES MAURAIN

Membre de l'Institut
Doyen de la Faculté des Sciences
Directeur de l'Institut de Physique du Globe
et du Bureau Central de Magnétisme Terrestre

*Hommages respectueux de
reconnaissance.*

TO HON. MANUEL L. QUEZON

President of the Philippine Senate

*With my very sincere
gratitude.*



Digitized by the Internet Archive
in 2026

ÉTUDE DU COMPAS MAGNÉTIQUE A INDUCTION ET DU PERFECTIONNEMENT DE CET APPAREIL

INTRODUCTION

Le compas à induction présente beaucoup d'intérêt surtout pour la navigation aérienne, car ce genre de compas possède plusieurs avantages sur le compas magnétique ordinaire. Le compas généralement employé dans l'aviation est le compas à liquide, mais même le plus perfectionné, ce type est sensible aux mouvements de tangage et de roulis et aux virages rapides. Ces mouvements peuvent donner une erreur sur la lecture de la rose.

Pendant les évolutions et dans les virages d'avion, le liquide qui sert pour amortir les oscillations de la rose et pour diminuer son frottement sur son pivot, entraîne la rose. Pour diminuer l'entraînement on donne à la cuvette un diamètre plus grand que celui de la rose et on emploie des aimants avec un fort moment magnétique qui obéissent plus rapidement à l'action du champ terrestre.

M. Dunoyer ⁽¹⁾ a étudié avec beaucoup de soin l'entraînement des compas liquides de la Marine et il a trouvé que de cet entraînement peut résulter une erreur assez forte. Mais dans la navigation aérienne les évolutions sont plus rapides et l'entraînement est plus grand. Pendant les virages qui se font rapidement l'avion prend une inclinaison notable qui peut fausser momentanément les indications du compas, car par suite de la force centrifuge la rose s'incline avec l'avion, et il peut arriver ainsi qu'elle soit soumise à l'action non seulement de la composante horizontale du champ terrestre mais aussi de la composante verticale. La rose est alors dirigée par la résultante des deux composantes et l'erreur produite est très prononcée quand on fait un virage à l'Est ou à l'Ouest lorsqu'on suit le cap au Nord-Sud.

Dans le compas à induction, on évite ces inconvénients. L'induit ayant une vitesse de l'ordre de 2.400 tours par minute est un véritable gyroscope et étant suspendu à la cardan, il reste toujours vertical, car un couple considérable doit agir pendant un temps considérable pour produire un déplacement appréciable de son axe de sa position verticale.

Un autre avantage du compas à induction est qu'étant placé loin du moteur et des masses magnétiques perturbatrices, la compensation est plus facile à établir. Il est préférable de loger l'induit dans la queue et si le

⁽¹⁾ L. DUNOYER, *Etude sur les compas de la Marine*, Thèse, 1909, p. 41-69.

fuselage est en matériel non-magnétique la compensation n'est pas nécessaire.

En plus il est plus facile pour un pilote de suivre son cap en observant que l'aiguille du galvanomètre est toujours à zéro. Le compas Bamberg ⁽¹⁾ a ce dernier dispositif mais il présente quelques inconvénients car le modèle actuel pèse 13,5 kgr., les accumulateurs non compris, et deuxièmement il présente tous les inconvénients d'un compas ordinaire.

Dans ce travail je présenterai une étude sur le compas à induction et le curieux phénomène de la disparition du courant. Les documents sur ce sujet sont très rares et incomplets.

J'ai cherché à augmenter la force électromotrice induite dans le cadre par le champ terrestre. J'ai pensé que si on pouvait réaliser une force électromotrice de l'ordre d'un volt, le phénomène de la disparition du courant serait évité. Mais il est impossible de réaliser un induit avec des dimensions et un poids raisonnables qui produise une f. e. m. d'un volt, car la valeur de la composante horizontale du champ terrestre est très faible, étant 0,196 gauss à Paris. J'ai étudié l'effet de fer doux et de mumétal (alliage de 78 % Ni — 22 % Fe) comme noyau de l'induit.

Le phénomène le plus important est la disparition du courant de l'induit et l'étude de ce phénomène est un des buts principaux de ce travail. Ce phénomène a été observé par plusieurs personnes, notamment

⁽¹⁾ *National Adv. Committee for Aeronautics, Report, 128, p. 41-44.*

MM. Dunoyer et Badin. Dans un entretien avec ces Messieurs que je remercie ici, ils m'avaient dit qu'ils ont observé ce phénomène curieux, mais il n'y a aucun document publié à ce sujet à ma connaissance. J'ai fait une étude assez longue de ce phénomène et enfin je crois avoir trouvé son explication et les moyens de l'éviter. J'ai observé aussi pendant mes expériences un autre phénomène qui se produit lorsqu'on touche n'importe quelle partie de l'appareil avec les doigts, des matières conductrices, et même avec un fil isolé, on observe une déviation brusque du galvanomètre. Pour éviter ce phénomène qui peut introduire une erreur dans la mesure on doit relier l'appareil au sol.

Dans les derniers chapitres on trouvera l'étude du phénomène de la disparition du courant et les dispositifs employés pour l'éviter. Avec ces dispositifs j'ai fait diverses expériences et des observations continues pendant un temps variant de 24 à 70 heures et je n'ai plus observé aucune disparition du courant. J'espère donc avoir résolu cette grave difficulté qui se présente dans l'emploi des compas à induction.

CHAPITRE PREMIER

LE COMPAS A INDUCTION TERRESTRE

1. Principe. — Le principe de cet appareil est celui de l'inducteur terrestre qui consiste à utiliser les courants induits qui sont produits dans une bobine ou système de bobines lorsqu'ils sont mis en mouvement dans le champ terrestre.

2. L'application de l'inducteur terrestre à la détermination du champ magnétique terrestre n'est pas nouvelle. Il a été employé avec de bons résultats pour la détermination de l'inclinaison. W. Weber ⁽¹⁾ en 1838 avait proposé de déterminer l'inclinaison, sans le secours d'une aiguille aimantée, par les décharges induites dans un cadre que l'on fait tourner de 180 degrés autour de l'un de ses diamètres, à partir d'un plan vertical perpendiculaire au méridien magnétique ou d'un plan horizontal. On maintient le circuit du cadre en relation avec un galvanomètre balistique. Les angles d'impulsion correspondant à α et α' du galvanomètre

(1) W. WEBER, *Pogg. Ann.*, t. XLIII, p. 293, 1838.

corrigés de l'amortissement de l'aiguille donnent la relation ⁽¹⁾ :

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{Z}{H} = \operatorname{tg} I,$$

Z étant la composante verticale du champ terrestre, H sa composante horizontale et I l'inclinaison.

La méthode a été depuis l'objet de longues recherches de nombreux savants. Parmi les plus connus sont Lord Kelvin ⁽²⁾ Wild ⁽³⁾ et E. Mascart ⁽⁴⁾. Ce dernier a indiqué une méthode de zéro pour obtenir plus de précision. N. E. Dorsey ⁽⁵⁾ a fait une étude théorique très étendue sur la théorie de l'inducteur terrestre comme inclinomètre.

La Carnegie Institution a employé dans les voyages du navire à voile le Carnegie, un inclinomètre à induction ⁽⁶⁾ et a obtenu des résultats très satisfaisants. Un inclinomètre de ce genre avait été construit par Wild à l'Observatoire de Pawlosk et cet appareil donnait, d'après l'auteur, l'inclinaison à 0,1 près.

3. L'inducteur terrestre comme compas. — Un certain nombre de tentatives ont été faites pour employer

⁽¹⁾ MASCART, *Traité de Magnetisme Terrestre*, chap. VI, p. 170. Voir aussi pp. 70-72.

⁽²⁾ LORD KELVIN, *Litt. and Phil. Soc. of Manchester*, p. 291, 1866-1867.

⁽³⁾ WILD, *Bull. de l'Acad. des Sc. de St. Petersb*, t. XXVII, p. 320, 1881.

⁽⁴⁾ E. MASCART, *Comptes rendus de l'Acad. des Sc.*, t. XCVII, p. 1191, 1883.

⁽⁵⁾ N. E. DORSEY, *Theory of the Earth Inductor*, *Terr. Mag.*, Vol. XVIII, pp. 1-38 (March., 1913).

⁽⁶⁾ *Ocean Magnetic Observations*, 1906-1916, vol. III, pp. 196-202.

l'inducteur terrestre comme compas magnétique, mais on n'a pas encore trouvé un appareil qui possède les qualités nécessaires pour un emploi satisfaisant dans la pratique.

4. Le compas électromagnétique Dunoyer ⁽¹⁾. — Le premier qui ait imaginé un appareil de ce genre pour les navires fut M. Dunoyer, dont le nom reviendra souvent au cours de ce travail. Son premier appareil consistait en un cadre tournant autour d'un axe vertical. Sur le collecteur frottent deux paires de balais. La ligne d'une de ces paires de balais est perpendiculaire à l'axe longitudinal du navire, tandis que l'autre est parallèle à cet axe. Pour employer l'appareil on fait tourner le cadre d'un mouvement uniforme et l'on met au moyen de l'interrupteur multipolaire les deux balais d'une même paire en communication avec le galvanomètre, et la déviation δ de celui-ci est notée. Si on se sert d'abord de la paire de balais fixée perpendiculairement à l'axe du navire, lorsque cet axe fait un angle α_0 avec le méridien magnétique, on a la relation :

$$\operatorname{tg} \delta = A \sin \alpha_0.$$

Si l'on se sert maintenant au moyen de l'interrupteur de la paire perpendiculaire à la première la déviation δ' est donnée par l'expression :

$$\operatorname{tg} \delta' = A \cos \alpha_0.$$

D'après ces deux relations on a :

$$\operatorname{tg}^2 \delta + \operatorname{tg}^2 \delta' = A^2.$$

(1) L. DUNOYER. — Brevet français N° 363, 861.

Ces deux mesures permettent de connaître le coefficient A dont la valeur varie avec la longitude, la latitude et la vitesse de rotation du cadre. Pour se servir de cet appareil il faut construire trois tableaux qui permettent de connaître les relations entre les facteurs A , α_0 , δ et δ' . Deux de ces tableaux sont sous les yeux de l'homme de barre.

5. Appareil Dunoyer perfectionné ⁽¹⁾. — M. Dunoyer, pour supprimer les tableaux qui ont quelques inconvénients, a construit un autre appareil qui comprend deux enroulements sur le même cadre mobile et deux séries de deux demi-bagues reliées aux deux galvanomètres par deux paires de balais. Sur le miroir des galvanomètres viennent se réfléchir respectivement deux lignes dont le point d'intersection des images sur une glace dépolie donne le cap obtenu ainsi par simple lecture. Le même auteur a trouvé que cette disposition des deux enroulements co-axiaux avait l'inconvénient d'entraîner une erreur allant jusqu'à 4 degrés due à l'induction mutuelle des deux enroulements et a proposé l'emploi des deux bobines superposées avec leur plan perpendiculaire l'un à l'autre pour éviter l'effet de l'induction mutuelle.

Dans ce deuxième montage on a pour la déviation d'un galvanomètre :

$$Y = A \sin \alpha$$

et pour l'autre :

$$X = A' \cos \alpha$$

⁽¹⁾ L. DUNOYER, Thèse, 1909, pp. 145-197.

puisque les balais correspondants sont calés à angle droit des premiers.

X et Y sont les coordonnées du point de rencontre des deux images lumineuses sur la glace dépolie quand le cadre est mis en mouvement, en supposant que ces images occupent des positions Ox , Oy quand la bobine ne tourne pas. On fait les deux circuits identiques autant que possible et en conséquence les valeurs de A et A' sont égales. L'angle de Ox avec le rayon reliant le point de rencontre des deux images est égale à l'angle α , car on a :

$$\frac{Y}{X} = \frac{A \sin \alpha}{A' \cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Dans cette expression, si le plan de symétrie longitudinal du navire est parallèle au plan passant par l'axe de rotation et le milieu des surfaces de contact des balais D et D₁, l'angle α sera le cap au compas du navire, pour l'endroit de celui-ci où les bobines ont été placées. Ce cap au compas sera connu par une lecture directe sur la glace dépolie graduée en degrés comme une rose au compas ordinaire. Cette lecture du cap sera indépendante de l'intensité de la composante horizontale H ainsi que du nombre de tours du moteur par seconde.

6. Compas à induction Titterington. — M. M. Titterington ⁽¹⁾, au lieu d'employer un galvanomètre comme indicateur, comme dans l'appareil de M. Dunoyer, a

⁽¹⁾ M. M. TITTERINGTON, *Perfectionnement aux Compas à Bobine Tournante*, Brevet N° 563, 988, octobre 1923

utilisé un système qui bien que comportant les éléments usuels associés à un compas magnétique, n'agit pas dans le présent cas comme le dernier, mais ses indications dépendent des champs créés par l'induit tournant. Le principe est toujours le même. Deux bobines, dont les plans sont perpendiculaires, sont enroulées sur un noyau d'induit monté sur un arbre supporté par un cardan. Sur le collecteur à quatre lames frottent deux paires de balais. L'une de ces paires est placée de telle façon qu'elle soit perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'avion tandis que l'autre est dans un plan parallèle à celui-ci.

L'indicateur consiste en un aimant porté par un arbre à l'extrémité supérieure duquel est fixée une rose des vents. Cet aimant se trouve placé au milieu des deux bobines dans la boîte de l'indicateur. Tout l'ensemble est enveloppé par cette boîte de fer doux de manière que l'aimant soit protégé contre l'effet du champ magnétique terrestre.

Les deux bobines de l'indicateur sont en communication électrique avec celles de l'induit par les fils électriques reliés aux deux paires de balais, frottant sur le collecteur. La fonction de l'aimant est la même que celle de l'aiguille d'un compas ordinaire mais elle dépend de l'action des champs créés dans les deux bobines de l'indicateur par les courants produits dans l'induit tournant. Comme dans les autres appareils décrits, les courants envoyés aux deux bobines de l'indicateur dépendent des positions des lignes des deux paires de balais en relation avec le méridien magnétique-

7. Pour décrire le fonctionnement de ce genre de compas nous allons supposer d'abord que sur un avion où le compas est monté, les deux paires de balais sont fixées de telle façon que l'une de ces paires est dans un plan parallèle à l'axe longitudinal de l'avion et la deuxième perpendiculaire à cet axe. La première paire de ces balais communique avec la première bobine de l'indicateur qui est placée perpendiculairement à l'axe longitudinal tandis que l'autre communique avec la deuxième bobine, le plan de laquelle est parallèle à cet axe. Supposons que l'avion sur lequel le compas est monté fait route dans la direction Nord-Sud. Dans cette position la première paire de balais prend le maximum du courant et par conséquent un champ magnétique est créé dans la première bobine de l'indicateur perpendiculaire à son plan de sorte que l'aimant indicateur se met en alignement avec l'axe de cette bobine et la rose tourne jusqu'à ce que le point Nord de la rose se trouve en face de la ligne de foi et indique en conséquence que l'avion fait route au Nord. En même temps le champ est nul dans la deuxième bobine parce que la deuxième paire de balais dans cette position ne prend aucun courant et ne provoque aucun champ dans la deuxième bobine. Le résultat est que la deuxième bobine n'exerce aucune influence sur l'aimant. De même façon on verra que la direction des positions occupées par l'aimant dépend de l'action du champ résultant des deux champs créés par les bobines de l'indicateur. Ces deux champs dépendent de l'angle que les deux paires de balais font avec le méridien magnétique.

8. Avantage de ce type de compas. — Les avantages de ce compas sont que l'indication de l'aimant est indépendante de l'influence directe du champ terrestre ; qu'il n'est pas très sensible aux vibrations, et que les champs perturbateurs du moteur et des pièces magnétiques de l'avion n'ont pas d'influence sur le compas, car l'ensemble de l'indicateur est protégé par une boîte de fer doux qui fonctionne comme écran magnétique. L'induit soumis à l'influence du champ terrestre et des champs du moteur et les masses magnétiques est logé loin de ceux-ci dans la queue. Cet emplacement permet d'obtenir une compensation telle qu'il ne subsiste que des influences perturbatrices nulles ou négligeables.

9. Autre modèle de compas Titterington. — C'est le type que la Société Pioneer a adopté pour l'aviation. Dans ce modèle l'induit est le même que celui décrit plus haut mais on a employé une paire de balais portée par une roue dentée ; et au lieu d'un indicateur semblable à celui d'un compas ordinaire on a utilisé un galvanomètre comme indicateur de la route. La méthode de zéro a été employée dans cette forme d'exécution. L'orientation des balais est commandée par le pilote ou navigateur au moyen d'un transmetteur du cap. Ce dernier est constitué par un cadran démultiplié tournant devant un repère. Le mouvement est transmis par une série d'arbres reliés par des cardans jusqu'au support des balais qu'il fait tourner de l'angle correspondant par l'intermédiaire de la vis sans fin et de la roue dentée.

L'indication du galvanomètre dépend de l'angle que la ligne des balais fait avec le méridien magnétique, de la valeur de la composante horizontale H et de la vitesse de rotation de l'induit. On voit que la sensibilité de cet appareil dépend de la valeur de la composante horizontale et de la vitesse de rotation. Le fonctionnement du compas décrit est simple. Dans ce modèle la différence de potentiel aux balais est nulle quand la ligne des balais est dirigée su vant la direction Est-Ouest et maximum lorsqu'elle est Nord-Sud. Puisque l'orientation de la ligne des balais est commandée par le pilote, il la repère par rapport à l'axe de l'avion de telle façon que cette ligne des balais soit dans la direction Est-Ouest. Dans cette position l'indication du galvanomètre est zéro, et si la ligne des balais reste dans cette position, c'est que l'avion est maintenu au cap choisi. Ce type de compas a été employé par Lindbergh ⁽¹⁾, le commandant Byrd, et Chamberlin pendant leur traversée de l'Atlantique. Mais il semble que seulement celui de Lindbergh a fonctionné parfaitement tandis que ceux de Byrd et Chamberlin paraissent avoir eu les aiguilles de leurs galvanomètres collées. Les aviateurs n'ont pu donner aucune explication précise de ce phénomène.

10. Le Compas à Induction Heyl et Briggs ⁽²⁾. — Un

⁽¹⁾ Lindbergh pendant son raid New-York-Paris a employé un compas à induction Pioneer. — *L'Aéronautique*, juin 1927 ; *L'Aérophile*, p. 58, 15 juin 1927 ; *Les Ailes*, 2 juin 1927.

⁽²⁾ Dr P. HEYL and Dr L. BRIGGS, *National Advisory Committee for Aeronautics*, Rep. 128, p. 44 ; U. S. Patent, 1.660, 751 ; *The Official Gazette of the U. S. P. O.*, Feb. 28, 1928.

type de compas à induction a été construit par les docteurs Heyl et Briggs du Bureau of Standards de Washington. Ils ont employé du fer doux pour le noyau de l'induit pour diminuer ses dimensions. Le noyau consiste en 4 barreaux de fer doux perpendiculaires l'un à l'autre autour desquels sont enroulés les fils en séries comme un enroulement fermé. Sur le collecteur à quatre lames frottent 4 balais calés de 90°. La fixation des balais est faite de telle façon que, lorsque l'avion se trouve dans une ligne faisant un angle θ avec le méridien magnétique, les potentiels aux deux paires de balais sont proportionnels à $\sin \theta$ et $\cos \theta$.

Puisque généralement

$$m \sin \theta + n \cos \theta = 0$$

si $\tan \theta = -\frac{n}{m}$ l'indication du galvanomètre peut être amenée à zéro dans un cap quelconque par la combinaison, addition ou soustraction des potentiels entre les deux paires de balais. On réalise cette combinaison en tournant un cadran portant la graduation du compas sur sa face supérieure et des contacts diamétralement opposés sur sa surface inférieure. Ces contacts glissent sur un système de résistances ayant la forme d'un carré et les fils de connexion du galvanomètre sont reliés à ces contacts par l'intermédiaire d'une autre paire de contacts glissants.

La théorie mathématique de ce système de transmetteur montre que si une résistance circulaire était employée, il y aurait une erreur pouvant atteindre une valeur de 4°. Cette erreur est éliminée par l'emploi d'une résis-

tance carrée. Nous n'avons pas connaissance que ce type de compas ait été employé dans la pratique.

11. Remarque sur ces différents types. — Dans ces divers types de compas le principe est le même. L'induit est toujours une petite génératrice électrique à courant continu avec un système de bobine ou plusieurs bobines. Les différences sont essentiellement dans le système du transmetteur du cap et le type de l'indicateur.

CHAPITRE II

THÉORIE ET DESCRIPTION DU MONTAGE

1. Pour étudier les conditions d'emploi et le phénomène de la disparition du courant du compas à induction terrestre un appareil a été construit avec un système de balais orientable commandé par un transmetteur du cap mécanique permettant d'employer la méthode de zéro. Le nombre des parties de cet appareil a été réduit le plus possible pour le rendre plus simple et pour faciliter l'étude du phénomène perturbateur qui se produit dans l'emploi de cet appareil. Dans le dernier chapitre sera décrit l'appareil perfectionné établi finalement.

2. Description du montage de l'appareil. — Un cadre C (fig. 1) sur lequel sont enroulés N spires de fil est animé d'un mouvement de rotation rapide et uniforme autour d'un axe vertical A dans le champ magnétique terrestre. La poulie P_1 est reliée par une courroie avec la poulie P_2 solidaire avec l'axe d'un petit moteur électrique M qui est placé à une distance de deux mètres du cadre pour que l'influence du champ magnétique du moteur sur

le champ terrestre dans lequel le cadre tourne, soit négligeable. La vitesse est réglée par le rhéostat R_h . Perpendiculairement à l'axe A et solidaire avec lui est un collecteur à deux lames D_1 et D_2 . Les extrémités de

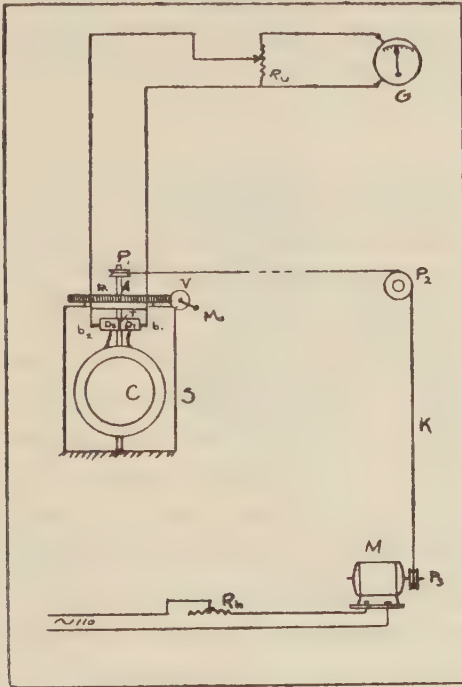


Fig. 1. — Schéma du montage.

la bobine sont reliées à ces lames. Les lames dans la forme de deux demi-bagues en cuivre sont isolées l'une de l'autre par les touches isolantes T et T_1 . Ces touches sont situées aux extrémités du diamètre perpendiculaire au plan des spires. Sur le collecteur frottent deux balais b_1 et b_2 dont les contacts sur le collecteur sont dia-

métralement opposés. Ces balais sont montés sur les porte-balais fixés au-dessous de la roue dentée R. Si l'on tourne la manivelle M_a qui est solidaire d'une vis sans fin V, elle entraîne avec elle la roue dentée et par conséquent les balais. Les balais sont reliés à un galvanomètre G à cadre mobile par l'intermédiaire d'un réducteur universel Ru.

3. Principe. — Si l'on fait tourner le cadre dans le champ magnétique terrestre il coupe le flux terrestre et par conséquent des courants sont induits dans le cadre. Mais comme dans le cas d'un induit de dynamo à axe vertical tournant dans le champ terrestre la différence de potentiel aux balais dépend de l'angle existant entre la ligne de balais et la direction du champ terrestre. L'énergie fournie par le cadre ou induit est fonction de l'angle entre la position de la ligne des balais et la direction du méridien magnétique. Dans le cas de l'appareil que nous avons fait construire, l'énergie, est maximum quand la position de la ligne des balais est dans la direction Nord-Sud et minimum (zéro) lorsqu'elle est dans la position Est-Ouest. La position particulière qui correspond à la valeur zéro du potentiel ne présente pas d'importance spéciale.

Il suffit que, au cours d'une rotation des balais de l'induit de 360° se présentent deux positions où l'énergie est maximum et deux positions où l'énergie est nulle.

4. Pour comprendre mieux le fonctionnement du compas à induction terrestre nous présenterons ici un

exposé de la théorie fondamentale qui a été donnée par M. Dunoyer ⁽¹⁾. Dans la figure 2 on voit en projection horizontale le circuit C et le collecteur à deux lames formées de deux demi-bagues D_1 et D_2 auxquelles sont reliées les extrémités du circuit C, les touches isolantes T_1 et T_2 et les balais b_1 et b_2 . Comme montré dans la figure 2, nous prenons pour origine du temps l'instant

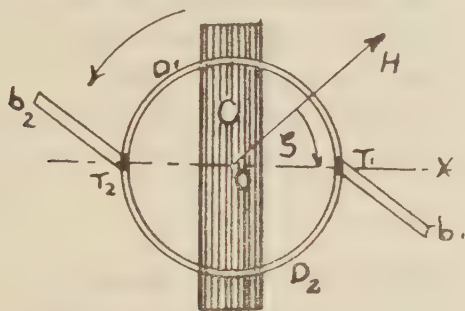


Fig. 2.

où les touches passent exactement sous les balais. Soit H la valeur du champ terrestre agissant au centre la bobine tournante. On suppose que ce champ est réparti uniformément dans l'espace occupé par la bobine à tous les caps. Appelons ζ l'angle que ce champ terrestre fait avec la ligne OX passant par l'axe de rotation et le milieu des surfaces de contacts des balais, c'est-à-dire que ζ est l'angle que le méridien magnétique fait avec la ligne de balais à l'instant de commutation. La flèche dans la figure indique le sens de rotation et le sens positif pour compter les angles est celui du mouvement des

⁽¹⁾ L. DUNOYER, Thèse, 1909, pp. 149-155.

aiguilles d'une montre suivant l'usage dans l'emploi du compas.

Nous désignerons par :

R_0 = La résistance totale du circuit complet ;

r_1 = La résistance de la bobine, du galvanomètre
et des fils de connexion ;

r_2 = La résistance du contact qui diminue de l'in-
fini à une valeur constante très petite ;

L = Le coefficient de self-induction ;

S = La surface totale des spires ;

q = La quantité d'électricité qui circule dans le
circuit pendant une demi-tour, c'est-à-dire

de temps $t = 0$ à $t = \frac{\pi}{\omega}$.

i = La valeur du courant à l'instant t ;

ω = La vitesse angulaire de l'induit ;

Φ_m = La valeur maximum du flux qui traverse la
bobine.

On a

$$\begin{aligned}\Phi_m &= HS \\ \Phi &= \Phi_m \cos (\omega t + \zeta) \\ e &= -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{dt}{d} \Phi_m \cos (\omega t + \zeta) \\ &= \Phi_m \omega \sin (\omega t + \zeta)\end{aligned}$$

e étant la force électromotrice qui règne dans le circuit.

$$\begin{aligned}iR + L \frac{di}{dt} - e &= 0 \\ (1) \quad iR + L \frac{di}{dt} &= \Phi_m \omega \sin (\omega t + \zeta)\end{aligned}$$

R dans cette expression est la résistance totale du circuit
à l'instant t .

On a donc

$$(2) \quad q = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} i dt = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \frac{e}{R} dt - L \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \frac{1}{R} \frac{di}{dt} dt.$$

Pour le calcul de l'expression (2) nous supposons que R est constamment égal à R₀. On a donc

$$(3) \quad q = \frac{1}{R_0} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \Phi_m \omega \sin (\omega t + \zeta) dt - \frac{L}{R_0} \left(i_{\frac{\pi}{\omega}} - i_0 \right)$$

ou $q = \frac{2\Phi_m}{R_0} \cos \zeta$

parce que

$$i_0 = i_{\frac{\pi}{\omega}} = 0.$$

Si le cadre a une vitesse de 2N demi-tours par seconde la quantité d'électricité que sera envoyée dans le galvanomètre par seconde sera égale au courant continu d'intensité

$$(4) \quad I = \frac{4\Phi_m N}{R_0} \cos \zeta$$

d'où on a

$$(5) \quad \delta = \frac{4\Phi_m N G}{R_0} \cos \zeta$$

δ étant la déviation indiquée par le galvanomètre et G son coefficient de sensibilité.

D'après cette relation (4) on voit que lorsque la ligne des balais est perpendiculaire au méridien magnétique, c'est-à-dire ζ égale à 90° la déviation est nulle et inversement si la ligne des balais coïncide avec la direction Nord-Sud la valeur de δ est maximum. Si on

règle la position de la ligne des balais de telle façon que ζ soit toujours égale à 90° par rapport au méridien magnétique pour un cap quelconque, I et δ deviennent égales à zéro.

Pour le calcul de l'expression

$$\delta = \frac{4\Phi_m NG \cos \zeta}{R_0}$$

nous avons supposé que R, la résistance à chaque instant, est constamment égale à R_0 , mais en toute rigueur R varie avec la surface de contact des balais sur le collecteur et par conséquent avec le temps. Or faisant ζ égale à 90° , la valeur de l'expression est nulle et la variation de R ne donne naissance à aucune erreur sur l'exactitude de la formule dans ce cas particulier.

5. Considérons l'axe longitudinal de l'avion OC (fig. 3)

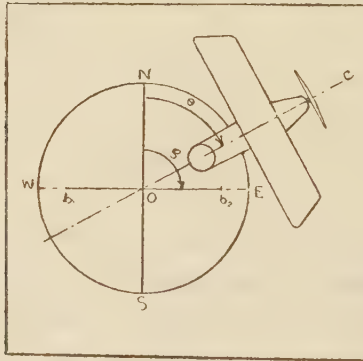


Fig. 3.

qui coïncide avec un cap donné, b_1 et b_2 la ligne des balais dans la direction Est-Ouest perpendiculaire à la

ligne SON coïncidant avec le méridien magnétique. Dans cette position θ est le cap au compas et la valeur de δ est zéro car ζ est égale à 90° .

Si au contraire, on fixe la ligne des balais sur l'axe longitudinal de l'avion, c'est-à-dire si la ligne $b_1 b_2$ coïncide avec OC, ζ devient égal à θ . Mais comme on voit la valeur de l'expression

$$\delta = \frac{4\Phi_m NG}{R_0} \cos \theta$$

n'est pas égale à zéro sauf lorsque l'avion suit la direction Est-Ouest. La valeur de δ dépend non seulement de θ mais aussi de la valeur de Φ_m qui varie d'un lieu à l'autre sur la surface du globe, et de N, la vitesse de rotation de l'induit, qui ne peut pas être rigoureusement constante et par conséquent le cap indiqué n'est pas fiable. Il faudrait deux paires de balais diamétralement perpendiculaires l'une à l'autre et un indicateur du cap du type Dunoyer. Avec ce dispositif l'indication ne dépend pas de Φ_m et N mais de la valeur de la tang. ζ , et on peut lire le cap directement.

Dans cette disposition il faut tenir compte de la manière dont R varie. M. Dunoyer ⁽¹⁾ a exposé une méthode de calcul très intéressante et a montré que l'erreur d'un appareil de ce genre due à la variation de la résistance, totale est de l'ordre de quelques minutes. Selon sa méthode nous avons calculé que l'erreur possible de notre appareil est environ 3 minutes. Cette erreur est tout à fait insignifiante.

(1) L. DUNOYER, Thèse. 1909, pp. 151-154.

6. Etude de l'exactitude de la Formule $I = \frac{4\Phi_m N}{R} \cos \zeta$
par la méthode de M. Dunoyer.

En appliquant ce mode de solution on peut écrire l'expression (3) de manière exacte (p. 21), en désignant par α l'angle sous-tendu par la partie isolante.

$$q = 2\Phi_m \frac{\cos \zeta}{R_0} + \int_0^{\frac{\alpha}{\omega}} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \left(e - L \frac{di}{dt} \right) dt \\
+ \int_{\frac{\pi - \alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \left(e - L \frac{di}{dt} \right) dt.$$

Pour le calcul du courant i il faut connaître la manière dont R varie avec les surfaces de contact des balais sur le collecteur et par conséquent avec le temps. Pour le calcul de i pour chaque instant des intervalles $\left(0, \frac{\alpha}{\omega}\right)$ et $\left(\frac{\pi - \alpha}{\omega}, \frac{\pi}{\omega}\right)$ M. Dunoyer a supposé que la résistance au contact pendant ces intervalles varie en raison inverse de la surface de contact des balais avec le collecteur et par conséquent en raison inverse de t pendant ces intervalles. Soit ρ la résistance au contact pendant l'intervalle $0, \frac{\alpha}{\omega}$.

$$\rho = r_2 \quad \text{pour} \quad t = \frac{\alpha}{\omega}.$$

On a alors

$$\rho = \frac{r_2 \alpha}{\omega} \frac{1}{t}.$$

Soit θ le temps au bout duquel la résistance ρ est inférieure à la résistance χ que l'on peut introduire dans

le circuit sans changer sensiblement la déviation du galvanomètre. On a

$$\theta = \frac{x}{\omega} \frac{r_2}{Z} = \frac{x}{\omega} K = \frac{x'}{\omega}.$$

On peut intégrer maintenant l'expression q entre les limites

$$\left(0, \frac{\alpha'}{\omega}\right) \quad \text{et} \quad \left(\frac{\pi - \alpha'}{\omega}, \frac{\pi}{\omega}\right).$$

Dans ces intervalles on augmentera la valeur absolue des termes correctifs en supposant R constamment infini.

Premier terme correctif

$$\begin{aligned} -\frac{1}{R_0} \int_0^{\frac{\alpha'}{\omega}} \left(e - L \frac{di}{dt} \right) dt &= -\frac{1}{R_0} \int_0^{\frac{\alpha'}{\omega}} \Phi_m \omega \sin (\omega t + \zeta) dt \\ &+ \frac{L}{R_0} i_{\frac{\alpha'}{\omega}} = \frac{\Phi_m}{R_0} \left[\cos (\alpha' + \zeta) - \cos \zeta + \frac{L}{\Phi_m} i_{\frac{\alpha'}{\omega}} \right]. \end{aligned}$$

Deuxième terme correctif

$$\begin{aligned} -\frac{1}{R_0} \int_{\frac{\pi - \alpha'}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} \left(e - L \frac{di}{dt} \right) dt \\ = \frac{\Phi_m}{R_0} \left[-\cos \zeta + \cos (\zeta - \alpha') - \frac{\Phi_m}{L} i_{\frac{\pi - \alpha'}{\omega}} \right]. \end{aligned}$$

En posant ces deux termes dans l'expression pour q on a

$$\begin{aligned} q &= \frac{2\Phi_m}{R_0} \cos \zeta + \frac{\Phi_m}{R_0} \left[-2 \cos \zeta + \cos (\zeta - \alpha') \right. \\ &\quad \left. + \cos (\zeta + \alpha') + \frac{L}{\Phi_m} \left(i_{\frac{\alpha'}{\omega}} - i_{\frac{\pi - \alpha'}{\omega}} \right) \right] \\ &= \frac{\Phi_m}{R_0} \left[\cos (\zeta - \alpha') + \cos (\zeta + \alpha') + \frac{L}{\Phi_m} \left(i_{\frac{\alpha'}{\omega}} - i_{\frac{\pi - \alpha'}{\omega}} \right) \right]. \end{aligned}$$

La valeur du courant i est

$$i = -e^{-\int_0^{\frac{\varepsilon R}{L}} dt} \int_0^t \frac{\Phi_m \omega}{L} \sin(\omega t + \zeta) e^{\int_0^t \frac{R}{L} dt} dt.$$

Dans l'intervalle $0, \frac{\alpha'}{\omega}$ on a

$$i_{\frac{\alpha'}{\omega}} = \frac{e^{\int_0^{\frac{\varepsilon R}{L}} dt} \int_0^{\frac{\alpha'}{\omega}} \frac{\Phi_m \omega}{L} \sin(\omega t + \zeta) dt}{e^{\int_0^{\frac{\alpha' R}{L}} dt}}$$

ε étant une valeur de t comprise entre 0 et $\frac{\alpha'}{\omega}$, ou encore

$$i_{\frac{\alpha'}{\omega}} = \frac{e^{\int_0^{\frac{\varepsilon R}{L}} dt}}{e^{\int_0^{\frac{\alpha' R}{L}} dt}} \frac{\Phi_m}{L} [\cos \zeta - \cos(\alpha' + \zeta)].$$

En adoptant la même hypothèse faite pour R on a

$$\begin{aligned} e^{\int_0^{\frac{\varepsilon R}{L}} dt} &= e^{\frac{1}{L} \int_0^{\varepsilon} \left(r_1 + \frac{r_2 x}{\omega t} \right) dt} = e^{\frac{r_1}{L} \left(\varepsilon - \frac{\alpha'}{\omega} \right) + \frac{r_2 x}{\omega L} \log \frac{\varepsilon}{\alpha'}} \\ &= e^{\frac{r_1}{L} \left(\varepsilon - \frac{\alpha'}{\omega} \right) + \left(\frac{\varepsilon \omega}{\alpha'} \right) \frac{r_2 x}{\omega L}}. \end{aligned}$$

Cette quantité croît de 0 à 1 lorsque ε varie de 0 à $\frac{\alpha'}{\omega}$.
En désignant sa valeur par u , on a

$$i_{\frac{\alpha'}{\omega}} = \frac{\Phi_m}{L} u [\cos \zeta - \cos(\alpha' + \zeta)] \quad (0 < u < 1).$$

De la même on a dans l'intervalle $\frac{\pi - \alpha}{\omega}, \frac{\pi}{\omega}$

$$i = -e^{-\int_t^{\frac{\pi}{\omega}} \frac{R}{L} dt} \int_t^{\frac{\pi}{\omega}} \frac{\Phi_m \omega}{L} \sin(\omega t + \zeta) e^{\int_t^{\frac{\pi}{\omega}} \frac{R}{L} dt} dt,$$

d'où

$$i_{\frac{\pi - \alpha'}{\omega}} = \frac{\Phi_m}{L} u' [\cos \zeta - \cos (\zeta - \alpha')] \quad (0 < u' < 1).$$

Finalement

$$\begin{aligned} q &= \frac{\Phi_m}{R_0} \{ \cos (\zeta - \alpha') + \cos (\zeta + \alpha') \\ &+ u [\cos \zeta - \cos (\alpha' + \zeta)] - u' [\cos \zeta - \cos (\zeta - \alpha')] \} \\ &= \frac{\Phi_m}{R_0} [2 \cos \zeta \cos \alpha' + (u + u') \sin \zeta \sin \alpha' \\ &+ (u' - u) \cos \zeta \cos \alpha' + (u - u') \cos \zeta] \end{aligned}$$

ou

$$q = \frac{a \Phi_m}{R_0} \cos (\zeta + \beta)$$

en posant

$$\begin{aligned} a \sin \beta &= -(u + u') \sin \alpha' \\ a \cos \beta &= 2 \cos \alpha' + (u - u') (1 - \cos \alpha'). \end{aligned}$$

On a $\alpha = \frac{1}{25}$, la largeur de touche isolante étant 1 millimètre et le diamètre du collecteur 50 millimètres

$$\alpha' = \alpha K \quad \text{où} \quad K = \frac{\chi}{r_2} = \frac{0,1}{5} = 0,02$$

$$\begin{aligned} \alpha' &= \frac{1}{25} \times 0,02 = 8 \times 10^{-4} \\ &= 2,75'. \end{aligned}$$

D'après cette valeur de α' on peut négliger le terme $(u - u') (1 - \cos \alpha')$ et l'on a

$$\begin{aligned} \tan \beta &= -\frac{(u + u')}{2} \tan \alpha' \\ a &= \sqrt{4 \cos^2 \alpha' + (u + u')^2 \sin^2 \alpha'} \end{aligned}$$

mais α' étant très petit on a

$$a = 2 \quad |\beta| < \alpha' \quad |\beta| < 2,75'$$

et l'expression

$$q = \frac{a\Phi_m}{R_0} \cos(\zeta + \frac{\epsilon}{2})$$

devient

$$q = \frac{2\Phi_m}{R_0} \cos \zeta.$$

On voit donc que l'erreur est de l'ordre de 3 minutes et l'expression,

$$\delta = \frac{4\Phi_m NG}{R} \cos \zeta,$$

possède une exactitude très supérieure à celle qui est nécessaire dans la pratique. D'après cette méthode de M. Dunoyer on voit que la valeur de β dépend de la largeur des touches isolantes, du diamètre du collecteur, de la résistance au contact et de la résistance totale du circuit indirectement.

CHAPITRE III

DESCRIPTION DE L'APPAREIL CONSTRUIT

1. L'appareil que nous avons fait construire sur ce principe comprend trois parties principales. Ce sont la génératrice, le transmetteur de cap, et l'indicateur. Les figures 4 et 5 représentent l'ensemble de la génératrice et le transmetteur de cap.

2. La génératrice. — Le groupe génératrice (fig. 4) est constitué par le cadre tournant N, le collecteur C, l'axe A A, les balais B et leurs porte-balais p_1 et p_2 et le moteur M (fig. 1) qui fait tourner l'induit par l'intermédiaire de la courroie agissante sur la poulie P. Les spires de la bobine sont enroulées autour d'un noyau en bois ⁽¹⁾.

(1) Le noyau du premier induit était en bronze, dans lequel des coupures sont pratiquées pour empêcher la production de courants de Foucault. Mais après essai, nous avons constaté que la position de zéro du galvanomètre variait lorsque la vitesse du moteur variait. La cause de cette variation n'est pas la self-induction du circuit car nous avons démontré dans le chapitre II que son influence sur la quantité d'électricité induite à chaque demi-tour serait tout à fait négli-

de forme sphérique. Cette forme donne une bonne solidité mécanique et favorise la stabilité de la bobine tour-

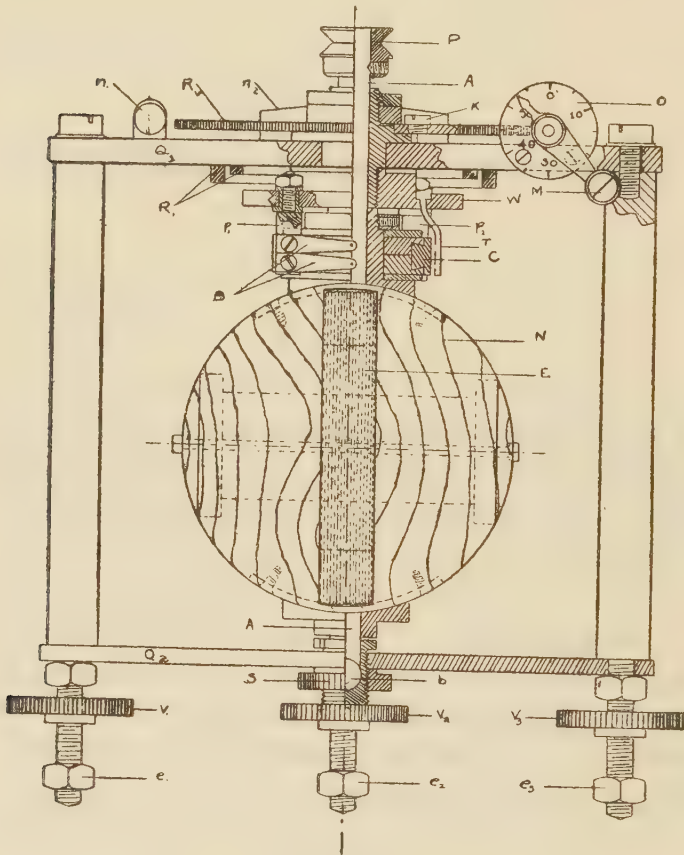


Fig. 1.

nante. Le noyau sphérique est creusé afin de permettre

geable. Nous l'avons attribué au champ créé par les courants de Foucault dans la masse métallique du noyau de l'induit.

Pour être sûr que la cause de la variation est due aux courants de

la mise en place du noyau magnétique à volonté. La bobine est disposée de façon à tourner sur l'axe vertical AA.

La génératrice est semblable à une génératrice électrique ordinaire, sauf en ce qu'elle utilise le flux magnétique terrestre au lieu d'un inducteur artificiel. Au bout inférieur de l'axe normalement vertical se trouve une bille pour diminuer le frottement. Cette bille est logée dans une cuvette avec les filets de vis que l'on peut tourner pour régler la hauteur de la position de l'induit. La cuvette montée dans une platine Q_2 supporte toutes les pièces tournantes tandis que la platine supérieure Q_1 en ébonite supporte les balais et les porte-balais, le disque W qui porte les porte-balais, les bagues R sur lesquelles frottent les deux frotteurs des porte-balais, la roue dentée R_v qui joue le rôle de rose des vents, les niveaux n_1 et n_2 et la vis sans fin avec la manivelle M. Les platines sont supportées par les trois postes aux extrémités inférieures desquelles se trouvent les vis calantes V_1 , V_2 , V_3 . Les écrous e_1 , e_2 et e_3 servent à fixer l'appareil sur la table ou sur une plateforme quelconque.

3. Nous avons pris la précaution de n'employer aucune matière magnétique. Toutes les pièces sont en lai-

Foucault induits dans le noyau qui tourne dans le champ terrestre, nous avons mis deux plaques en bronze de 4 millimètres d'épaisseur. Nous avons trouvé que la variation augmentait. L'erreur était d'environ 3 degrés lorsque l'on faisait varier la vitesse du moteur de 1.200 à 1800 tours par minute. Pour remédier à ce défaut nous avons construit un noyau en bois. Si l'on veut on peut employer des moulinets à pas automatiquement variable pour que la vitesse de rotation de l'induit reste sensiblement la même quelle que soit la vitesse de l'avion.

ton ou en bronze sauf la platine Q_1 qui est en ébonite. Nous avons fait des expériences avec des balais en charbon, en argent, et en laiton, sous la forme de petites roulettes montées sur les tiges de cuivre.

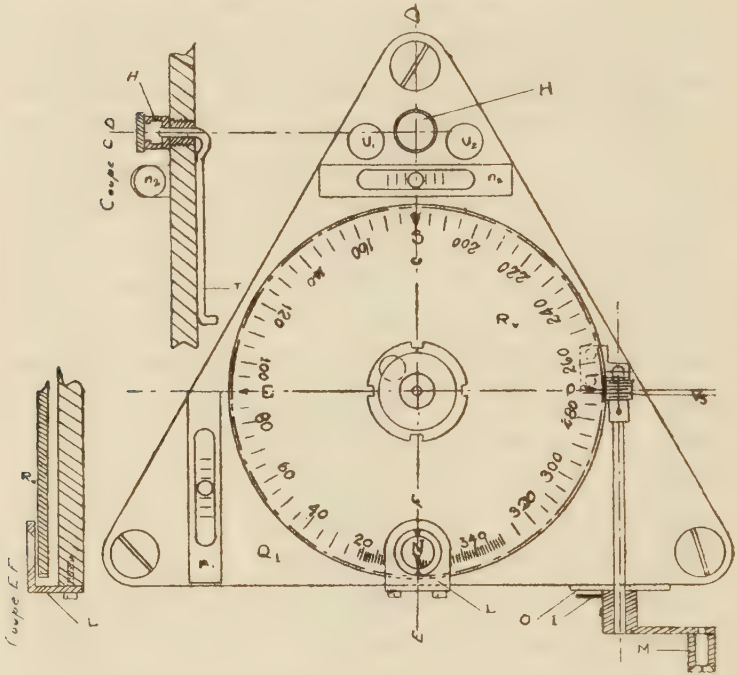


Fig. 5.

La figure 5 représente la vue par en haut de l'appareil. Sur la platine Q_1 , on trouve les deux niveaux l'un perpendiculaire à l'autre, les bornes u_1 et u_2 reliées aux bagues R (fig. 4) par les fils électriques, le dépôt de l'huile H , la ligne de foi L et la rose des vents R_v avec laquelle s'engage la vis sans fin. La rose est graduée de degré en degré et le petit disque O porte une graduation en

minutes. On sait que la direction du flux magnétique n'est horizontale qu'en quelques points sur la surface de la terre et qu'à la plupart des emplacements sur cette surface elle forme un angle considérable avec l'horizontale. Dans l'équateur magnétique l'inclinaison est nulle et la valeur de la composante verticale Z est égale à zéro tandis que la composante horizontale est maximum. Aux pôles magnétiques la composante horizontale H est nulle et la valeur de l'inclinaison est $\pm 90^\circ$ tandis que la composante verticale est maximum. C'est à la composante verticale du flux terrestre qu'est due la défectuosité du fonctionnement du type ordinaire de compas dans certaines positions de l'avion. Pour supprimer l'effet de la composante verticale dans notre appareil l'axe de rotation de l'induit est maintenu vertical par les moyens de deux niveaux à bulle d'air, à l'aide des trois vis calantes. Dans la pratique l'induit serait monté dans une suspension à la cardan qui permet la position verticale de l'axe de rotation quelle que soit la position de l'avion.

4. La bobine a 3200 spires de fils $\frac{20}{100}$ mm. avec deux couches de soie comme isolement. Le diamètre intérieur est 65 mm. et le diamètre extérieur 104 mm. Pour la protection contre l'humidité et le court-circuit entre les spires la bobine a été immergée dans un vernis isolant. Sur les spires nous avons mis du chatterton ensuite une bande de cuir pour serrer les fils et les protéger contre l'action de la force centrifuge. La résistance de l'induit est 535 ohms.

5. Le collecteur formé de deux demi-bagues est solidaire de l'arbre AA. Sur le collecteur frottent deux paires des balais en argent. Nous avons employé aussi des balais en charbon mais parce qu'ils travaillaient secs, nous avons observé que le frottement causait une usure assez rapide du collecteur. Les deux lames du collecteur sont isolées l'une de l'autre par deux touches isolantes en ébonite de 1 mm. d'épaisseur. Le diamètre des balais en argent est égal à l'épaisseur de la touche. Les porte-balais sont fixés au disque W qui tourne avec la roue dentée Rv comme une seule pièce. La roue dentée est entraînée par une vis sans fin qui est reliée au transmetteur du cap.

6. Au laboratoire, nous nous sommes servi pour commander la rotation de l'induit d'un petit moteur électrique de $\frac{1}{16}$ C. V. qui est capable de faire tourner l'induit jusqu'à 2400 tours par minute. On réglait la vitesse de rotation du moteur par un rhéostat. Le moteur était à une distance de deux mètres de l'induit pour que l'influence du champ magnétique du moteur sur l'induit fût négligeable. Dans la pratique lorsque l'appareil est monté sur un avion, on peut employer pour entraîner l'induit une petite hélice ou une turbine. Il faut que l'hélice ou turbine soit dessinée selon la vitesse normale de l'avion sur lequel l'appareil sera monté.

7. Le transmetteur de Cap. — Le transmetteur de cap comprend trois parties. Ce sont le système d'engre-

nages qui porte le cadran, l'arbre flexible avec la vis sans fin à son extrémité, et la roue dentée qui porte les balais. Le principe est analogue à celui d'une horloge avec un arbre flexible ou une série d'arbres pour relier la roue dentée au système d'engrenages.

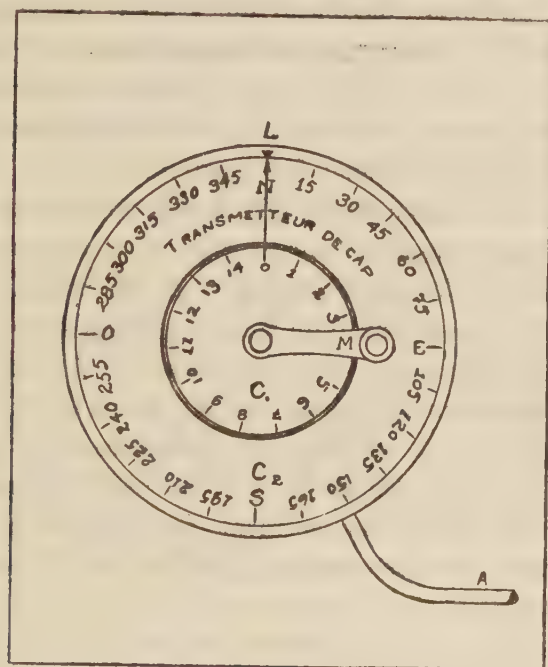


Fig. 6. — Le Cadran.

La figure 6 montre le cadran du transmetteur de cap du type Pioneer. La manivelle M sert pour tourner le système d'engrenage qui porte un petit cadran intérieur C_1 et le cadran extérieur C_2 qui joue le rôle d'une rose des vents. Le cadran C_1 porte 15 divisions de degré en degré tandis que le cadran C_2 portant les graduations

de la rose de compas est divisé de 15 degrés en 15 degrés. Pour chaque tour de la manivelle, le cadran C_1 tourne une fois, tandis que le cadran C_2 se déplace de 15 degrés devant le repère L servant comme ligne de foi.

Ce mouvement angulaire est transmis aux balais au moyen de l'arbre flexible A qui a à son extrémité une vis sans fin. Celle-ci entraîne la roue dentée qui porte les balais. Ce système avec un petit cadran supplémentaire au centre permet de réduire la grandeur de la rose et augmente aussi la précision de l'appareil.

Dans notre appareil de laboratoire nous avons établi pour plus de simplicité une vis sans fin et une manivelle pour tourner la roue dentée portant les balais. Si l'on tourne la vis sans fin d'un tour, les balais se déplacent sur le collecteur d'un degré. Le disque O (fig. 5) gradué de 5 minutes en 5 minutes permet d'avoir une précision très supérieure à celle qui est nécessaire dans la pratique. Par le moyen de la ligne de foi L ou point de repère on voit le déplacement ou calage des balais en degrés. La roue dentée jouant le rôle de rose des vents est graduée de degré en degré et son diamètre est 115 mm. Chaque division représentant un degré est égale à un millimètre. On lit les fractions de degré sur le disque O.

Comme nous avons dit plus haut que l'induit serait placé loin de toutes les pièces magnétiques de l'avion, il faut employer un arbre flexible pour avoir une liaison entre la vis sans fin et le cadran de commande sur le tableau du pilote. Mais l'arbre flexible peut donner lieu à une erreur dans la transmission du mouvement

angulaire à cause de la torsion de l'arbre. Si l'on tourne la manivelle du transmetteur de quelque degrés et si l'angle de déplacement de balais ne correspond pas à cette rotation, l'erreur est due à la torsion de l'arbre. Pour diminuer l'erreur due à la torsion de l'arbre flexible on peut transmettre le mouvement angulaire par une série d'arbres rigides reliés par des cardans, jusqu'à la vis sans fin qui commande la roue dentée portant les balais. C'est ce dernier système qui a été employé dans l'appareil de Lindbergh. L'avantage d'un arbre flexible est qu'il est moins lourd et plus facile à installer.

8. L'indicateur. — L'indicateur est un galvanomètre relié électriquement par les fils aux bornes u_1 et u_2 (fig. 5) qui à leur tour sont reliés aux deux bagues sur lesquelles frottent les deux tiges de cuivre rouge des porte balais. On varie la sensibilité du galvanomètre par le moyen d'un réducteur universel permettant de faire varier la sensibilité dans les rapports $1/1$; $1/10$; $1/100$; $1/1000$; $1/10000$.

CHAPITRE IV

MÉTHODE DE MESURE ET RÉSULTATS

1. Méthode de mesure. — Nous commençons l'expérience par la lecture de zéro du galvanomètre ; puis on fait tourner l'induit en sens inverse, de celui des aiguilles d'une montre, à une certaine vitesse, par exemple 1 800 tours par minute. Si la ligne des balais ne coïncide pas avec la direction Est-Ouest, c'est-à-dire si elle n'est pas perpendiculaire au méridien magnétique, on verra une déviation du galvanomètre à gauche ou à droite du point de repère suivant la position de la ligne des balais. S'il y a une déviation, on ramène d'abord le galvanomètre à la position zéro. On vérifie les connexions en tournant la manivelle pour déplacer la ligne des balais à droite ou à gauche. Si lorsque l'on tourne les balais à droite, la déviation est à droite, les connexions sont exactes.

2. On lit sur la rose la position des balais qui coïncide avec la ligne de repère. Cette position est Est-Ouest. On tourne les balais par intervalles de 10 degrés et on lit la déviation correspondante. Nous reproduisons ici deux tableaux typiques des observations.

TABLEAU I

Sans le noyau de fer doux

Position des balais par rapport au méridien magnétique	Lecture sur l'échelle Position initiale 250	Déviations en mm. sur l'échelle = δ	Intensités en micro-ampères $I = \delta \times 0,48$
N 0°	392,2	142,2	68,3
10	390,0	140,0	67,2
20	383,5	133,5	64,1
30	373,5	123,5	59,4
40	360,0	110,0	52,9
50	345,0	92,0	44,3
60	322,0	72,0	34,6
70	299,0	49,0	23,5
80	275,0	25,0	12,0
E 90	250,0	0	0
100	226,0	24,0	— 11,5
110	202,0	48,0	— 23,0
120	180,5	69,5	— 33,4
130	160,5	89,5	— 43,0
140	144,5	105,5	— 50,6
150	127,5	122,5	— 58,5
160	117,8	132,2	— 63,5
170	110,5	139,5	— 67,0
S 180	108,0	142,0	— 68,0
190	110,5	139,5	— 67,0
200	118,1	131,9	— 63,0
210	130,0	120,0	— 57,3
220	144,0	106,0	— 57,5
230	160,5	89,5	— 50,9
240	180,0	70,0	— 43,0
250	201,5	48,5	— 23,3
260	225,0	25,0	— 12,0
O 270	250,0	0	0
280	275,2	25,2	12,2
290	300,0	50,0	24,0
300	321,0	71,0	33,1
310	341,5	91,5	43,9
320	357,5	107,5	51,7
330	374,0	124,0	59,5
340	384,0	134,0	64,4
350	390,5	140,5	67,5
N 360	392,2	142,2	68,3

TABLEAU II

Avec le noyau de fer doux

Position des balais par rapport au méridien magnétique	Lecture sur l'échelle Position initiale du Spot-250	Déviations en mm. sur l'échelle = δ	Intensités en micro-ampères $I = \delta \times 0,48$
N 00°	498,0	248,0	119,0
10	494,0	244,0	117,0
20	480,0	230,0	110,5
30	460,0	210,0	101,0
40	433,0	183,0	88,0
50	405,0	155,0	74,5
60	370,5	120,5	57,8
70	330,0	80,0	38,4
80	297,0	47,0	22,6
E 90	250,0	0	0
100	212,0	38,0	— 18,2
110	171,0	79,0	— 38,0
120	131,5	118,5	— 57,0
130	97,0	153,0	— 73,5
140	66,0	184,0	— 88,5
150	41,5	208,5	— 100,5
160	20,0	230,0	— 110,5
170	9,0	241,0	— 115,8
S 180	4,5	245,5	— 118,0
190	10,0	240,0	— 115,0
200	20,0	230,0	— 110,5
210	38,0	212,0	— 102,0
220	63,0	187,0	— 90,0
230	90,0	160,0	— 76,0
240	127,0	123,0	— 59,3
250	165,0	85,0	— 40,8
260	209,5	40,5	— 19,4
O 270	250,0	0	00
280	290,5	40,5	19,4
290	335,0	85,0	40,8
300	370,0	120,0	57,6
310	403,5	153,5	73,7
320	436,5	186,5	89,5
330	460,0	210,0	101,0
340	483,0	233,0	111,8
350	494,0	244,0	117,0
N 360	498,0	248,0	119,0

L'induit tournait à 1 700 tours par minute et la sensibilité du galvanomètre employé était 0,48 micro-ampère par division de l'échelle à une distance d'un mètre du galvanomètre. Les balais employés pour ces observations étaient en argent. Nous avons fait des expériences avec plusieurs types de balais

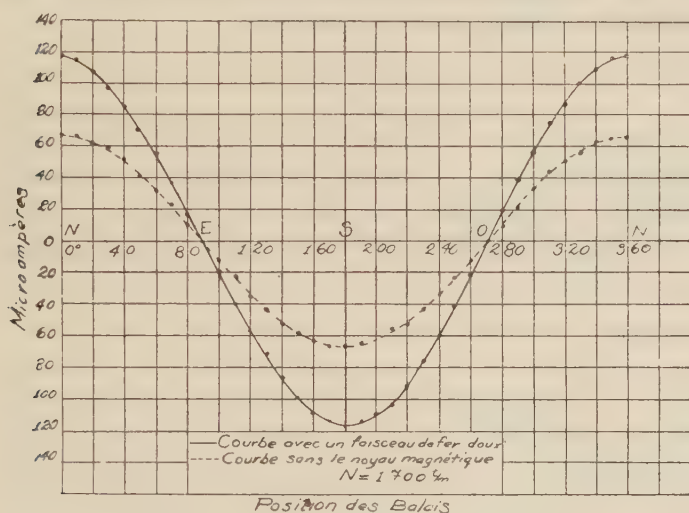


Fig. 7.

(charbon, argent, cuivre, laiton, zinc, maillechort, nickel, aluminium) et des roulettes en laiton, mais sauf pour ces dernières, l'intensité du courant indiquée par le galvanomètre était sensiblement la même pour tous. Les contacts entre le collecteur et les balais avec les roulettes n'étaient pas bons et il faudrait une pression très grande pour avoir quelques millimètres de déviation. Mais avec telle pression la vitesse de rotation diminuerait énormément. Nous allons exposer en détail le

mérite de chaque type de balais dans le chapitre consacré à la disparition du courant (chapitre VI).

La figure 7 représente des courbes typiques obtenues. La courbe pointillée représente la variation de l'intensité selon la position de la ligne des balais quand il n'y a pas le noyau magnétique. On voit qu'elle est sinusoïdale et qu'elle vérifie la formule

$$\delta = \left(\frac{4N\Phi_m}{R_0} \right) \cos \zeta,$$

ζ étant l'angle que la lignes des balais fait avec le méridien magnétique. La courbe en trait plein montre la variation de l'intensité lorsque l'on met un faisceau de fer doux, comme noyau. Sans le fer doux, l'intensité maximum est égale à 68,3 micro-ampères et 119 micro-ampères avec le faisceau de fer doux.

3. Le faisceau de fils de fer doux a été employé pour étudier l'accroissement de l'intensité lorsqu'un noyau magnétique est introduit dans la sphère creusée. Bien que la valeur de la composante horizontale soit très faible ($H = 0,1965$ à Paris) en plaçant le faisceau de fils isolés avec un diamètre de 2,75 cm. l'intensité augmente de 75 %. Les fils employés sont du type commercial de 75/100 mm. de diamètre. Les fils sont recuits après le découpage et ensuite isolés par un vernis émaillé.

4. Sensibilité de l'appareil. — Nous avons observé que lorsque l'induit tourne à 1 700 tours par minute, la déviation du galvanomètre est égale à 4 mm. par degré du calage de la ligne des balais par rapport au

méridien magnétique. La sensibilité du galvanomètre est 0,48 micro-ampère par millimètre à une distance d'un mètre de l'échelle. Puisque la déviation par degré est 4 mm. l'indication de cet appareil correspond à une rose de compas ordinaire de 46 cm. de diamètre.

5. **Sensibilité du compas à induction Pioneer** ⁽¹⁾. — A la vitesse normale (1 800 t/m), l'énergie de la génératrice est suffisante pour causer une déviation de l'extrémité de l'aiguille du galvanomètre d'au moins 0,4 mm. pour un degré d'éloignement du cap et une déviation d'au moins 10 mm. pour 30° départ du cap. Cette indication correspond à une rose du compas ordinaire de 4,6 cm. de diamètre. Cette sensibilité n'est pas suffisante.

6. A Paris, les lignes électriques des tramways, du Métropolitain et du Nord-Sud, créent des champs magnétiques et ceux-ci altèrent constamment le champ terrestre. Pour voir s'ils ont des effets sur l'indication de notre appareil, nous avons fait plusieurs observations prolongées pendant vingt quatre heures. Après une heure du matin, jusqu'à quatre heures, tous ces moyens de transport s'arrêtent et par conséquent le champ terrestre agit seul dans l'induit tournant. Mais nous n'avons pas constaté de changement appréciable à l'œil sur l'indication du galvanomètre. Elle reste la même pendant les observations, sauf lorsque la vitesse du moteur électrique varie avec la tension de la ligne (à courant alternatif).

⁽¹⁾ *Pioneer Earth Inductor Compass*. Type 301 D., Specification, p. 7.

CHAPITRE V

EFFETS D'UN NOYAU MAGNÉTIQUE

1. Comme nous l'avons dit plus haut, on peut augmenter la force électromotrice, en employant un noyau magnétique. Il est nécessaire d'avoir une force électromotrice assez grande pour permettre l'emploi d'un galvanomètre robuste qui peut résister aux mouvements désordonnés et aux fortes vibrations sans aucun effet sur l'indication de l'aiguille, et pour augmenter la sensibilité. Sans avoir un noyau magnétique on peut arriver même à construire un induit qui débitera une intensité suffisante mais cet induit sera embarrassant et le poids de cuivre très grand. Surtout dans un avion il faut réduire au minimum l'espace occupé par les instruments et leur poids.

2. L'emploi d'un noyau magnétique présente aussi des inconvénients parce qu'il y a des phénomènes d'hystérésis, de trainage magnétique et de courants de Foucault qui modifient le champ magnétique résultant dans la bobine ou système de bobines. Dans le cas général les résultats des expériences comportent des causes

multiples et sont très difficiles à interpréter parce que les trois phénomènes se superposent.

3. Courants de Foucault. — Toute masse métallique qui se déplace dans un champ magnétique est sillonnée par des courants de Foucault. Ils sont la cause de pertes assez grandes dans l'armature d'une dynamo et des transformateurs de haute fréquence. Ce qui nous intéresse est surtout l'action du courant induit dans le noyau magnétique sur son aimantation. Les expériences de Gray ⁽¹⁾ Helmholtz ⁽²⁾ Hopkinson ⁽³⁾ et Maurain ⁽⁴⁾ ont montré nettement le retard d'aimantation dû au courant induit. Helmholtz, a montré que si un circuit renferme une bobine dont le noyau est formé de fils de fer bien isolés les variations des courants sont à peu près aussi rapides que s'il n'y avait pas de fer, alors qu'un noyau massif le rend beaucoup plus lent. On peut réduire l'effet de ces courants par l'emploi de lames très minces ou de fils très fins. Pour réduire son effet au minimum, Shackelton et Barber ⁽⁵⁾ ont employé un noyau en poudre isolé de permalloy. Dommergue ⁽⁶⁾ en étudiant les résultats de Shackelton et

(1) TH. GRAY, *Proc. Roy. Soc. London*, t. LI, p. 503, 1892.

(2) HELMHOLTZ, *Pogg. Ann.*, t. LXXXIII, p. 535, 1851.

(3) J. HOPKINSON, *Proc. Roy. Soc. London*, t. LVI, p. 180, 1894.

(4) CH. MAURAIN, *Recherches sur les Ecrans Electromagnétiques et l'Influence de la Fréquence sur l'Energie Dissipée dans l'aimantation*, Thèse, 1898, pp. 58-67. Même auteur, *Annales de Chimie et de Physique*, t. XIV, p. 208, 1898.

(5) SHACKELTON and BARBER, *Proc. A. I. E. E.*, fév. 1929.

(6) FRANZ DOMMERGUE, *Annales de Post Télégraphes et Téléphones*, mai 1929. p. 463.

Barber a trouvé que les valeurs moyennes du coefficient des courants de Foucault pour la poudre de permalloy soit 50 % plus faibles que pour la poudre de fer. On voit d'après cet exposé que l'effet des courants de Foucault sera très faible et le retard sera négligeable par un bon choix du matériel et par la construction méthodique.

4. Trainage magnétique. — Une autre cause de retard d'aimantation de fer doux sur le champ est le phénomène du trainage magnétique que l'on observe spécialement dans les champs faibles. Ce phénomène consiste en ce que le fer n'obéit pas instantanément au champ ⁽¹⁾. Dans notre appareil ce phénomène n'empêche pas le bon fonctionnement car son effet sur le noyau est que celui-ci ne prend pas sa valeur maximum d'aimantation à l'instant, mais une grande partie seulement de sa valeur lorsqu'il est exposé plus longtemps à l'action du champ magnétisant. Le trainage magnétique ne déforme pas le champ terrestre.

5. Hystérésis. — Un phénomène qui joue un rôle très important est l'hystérésis. Les formules que nous avons établies plus haut s'appliquent uniquement aux circuits dont le coefficient de self-induction est constant ; cela n'est pas le cas lorsqu'il y a noyau magnétique puisque le rapport du flux à l'intensité n'est pas constant à cause du phénomène d'hystérésis ⁽²⁾. Ce

⁽¹⁾ MAURAIN, *Le Magnétisme du Fer*, p. 41, p. 52. WEISS et FOEX, *Le Magnétisme*, p. 95.

⁽²⁾ JANET, *Leçons d'Electrotechnique Générale*, t. II, chap. IX, p. 310.

rapport n'est pas le même pour les valeurs, ascendantes ou descendantes de l'intensité. La courbe de l'intensité du courant réel n'est pas sinusoïdale par suite de l'hystérésis.

M. Janet ⁽¹⁾ a montré que le courant fictif est en avance sur le flux d'un angle α que l'on désigne sous le nom d'angle d'avance hystérétique. On peut considérer l'angle α comme sensiblement constant et indépendant de la fréquence surtout pour les fréquences industrielles ⁽²⁾.

Dans ce cas ou l'angle d'avance hystérétique est constant le phénomène d'hystérésis ne gêne pas beaucoup le bon fonctionnement de notre appareil. La formule

$$\delta = \frac{4N\Phi_m G}{R_0} \cos \zeta$$

devient

$$\delta = \frac{4N\Phi_m G}{R} \cos (\zeta - \alpha).$$

6. On peut calculer cet angle α par la méthode de Steinmetz ou celle de Knapp ⁽³⁾. Mais dans le compas à l'induction où nous avons employé la méthode de zéro on règle la positive de la ligne des balais une fois pour toutes pour rendre compte de l'angle d'hystérésis ⁽⁴⁾. Nos expériences ont montré que même avec un noyau de fils de fer doux la position du zéro de

⁽¹⁾ Citation faite., page 315.

⁽²⁾ Même citation, page 316.

⁽³⁾ JANET, *L. Elec. Gen.*, p. 317.

⁽⁴⁾ La fréquence dans nos expériences était de 25 à 30.

l'appareil reste la même que lorsqu'il n'y a pas de noyau magnétique. Ces expériences ont été faites comme il suit : On faisait tourner l'induit sans les fils de fer doux et on cherchait la position des balais où la déviation du galvanomètre était zéro. On arrêtait l'induit et le noyau de fer doux était introduit dans le centre de la bobine et l'on recommençait l'expérience. Si la déviation du galvanomètre était toujours nulle, l'hystérésis du noyau était négligeable et par conséquent l'angle d'avance hystérétique était nul.

CHAPITRE VI

LE PHÉNOMÈNE DE LA DISPARITION DU COURANT

1. Un phénomène perturbateur qui se produit dans l'emploi des compas à induction et qu'il est difficile d'expliquer est la disparition du courant après quelques heures de rotation de l'induit. Nous avons observé ce phénomène très curieux en donnant à la ligne des balais un calage déterminé par rapport au méridien magnétique. Dans cette position des balais on observe une certaine déviation du galvanomètre. Cette déviation reste la même pendant un temps variant de 1 à 5 heures d'observation ou même plus et puis on observe qu'elle diminue lentement jusqu'à zéro, bien que l'induit continue à tourner.

Ce phénomène a été remarqué par plusieurs personnes notamment MM. Dunoyer et Badin ⁽¹⁾. Ainsi que Chamberlain, le commandant Byrd pendant son raid New-

⁽¹⁾ Je remercie M. Badin sincèrement pour les conseils et pour les informations qu'il m'a données sur le compas Pioneer.

York-Paris a observé que l'aiguille de l'indicateur du compas Pioneer paraissait collée. On a attribué la cause probable aux mauvaises connexions, à l'interruption du courant ou au frottement excessif au pivot du millivoltmètre.

2. Nous avons fait de nombreuses expériences avec notre appareil et nous avons observé les caractéristiques générales suivantes de la disparition du courant :

1^o Au début de l'expérience la déviation reste la même pendant quelque temps et puis on observe la diminution lente de la déviation du galvanomètre sans diminution de la vitesse de rotation de l'induit.

2^o Lorsque la vitesse de rotation est brusquement diminuée pour un instant la déviation monte et retombe ensuite à son ancienne position au moment où l'on donne à l'induit son ancienne vitesse.

3^o L'intervalle du temps de la disparition du courant varie avec les balais employés et leur pression sur le collecteur.

4^o Une fois que le phénomène a commencé, la déviation oscille lentement. Elle monte à sa position normale et redescend après quelques instants sans que la vitesse de rotation varie.

5^o Lorsqu'on touche le collecteur avec les doigts, un chiffon, des métaux, des poils, etc., à l'endroit où les balais ont frotté la déviation reprend sa position normale au début de l'expérience.

6^o Si l'on change les positions des balais sur le collecteur de telle façon qu'ils ne frottent plus sur les mêmes

endroits où ils ont frotté avant, la déviation monte à sa position normale.

3. Le tableau III montre une observation faite avec les balais en charbon. Chaque quart d'heure on notait la déviation et mesurait en même temps, la vitesse de rotation de l'induit. Pour la construction des courbes on a ramené les valeurs des déviations à une vitesse moyenne. Dans la figure 8 on verra la manière de la di-

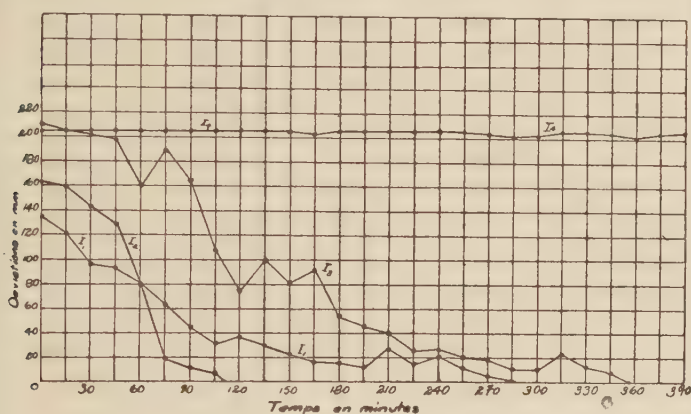


Fig. 8.

minution de l'intensité en fonction de temps avec des balais en charbon. Les courbes I_1 , et I_3 sont relevées avec mêmes balais dans les mêmes conditions sauf que le calage des balais était changé. La courbe I_2 est relevée avec les même balais mais la pression était plus forte. Nous avons essayé de donner une pression très légère mais l'intensité diminuait aussi. D'après les courbes on voit que la diminution de l'intensité n'est pas similaire même dans des conditions analogues.

TABLEAU III

Déviations. Balais en charbon

Temps 25-11-29	Lecture sur l'échelle	Déviations en mm.	Déviations corrigées pour 1800 t/m.	Tours-min.
17 ^h 00 ^m	460	210	210	1800
15	460	210	204	1850
30	454	204	202	1820
45	447	197	197	1800
18 ^h 00 ^m	412	162	159,5	1830
15	442	192	189,5	1825
30	415	165	165	1800
45	355	105	105,8	1790
19 ^h 00 ^m	325	75	75	1800
15	350	100	98,2	1830
30	330	80	81	1780
45	342	92	92	1800
20 ^h 00 ^m	303	53	53,6	1780
15	295	45	45	1800
30	289	39	38,8	1810
45	275	25	24,6	1830
21 ^h 00 ^m	277	27	26,7	1820
15	270	20	20,1	1790
30	268	18	18	1800
45	260	10	10	1800
22 ^h 00 ^m	260	10	10	1790
15	275	25	24,8	1815
30	264	14	14	1800
45	259	9	9	1795
22 ^h 50 ^m	250	0	0	1800

TABLEAU IV

Déviations. Balais en argent sans la brosse avec l'huile

Temps 11-12-29	Lecture sur l'échelle	Déviations en mm. Zéro du gal. 260	Déviations corrigées pour la vitesse 1660 t/min.	Tours-min.
11 ^h 30 ^m	490	230	230	1660
12,00	490	230	229	1670
30	485	225	229	1630
13 ^h 00 ^m	495	235	232	1680
30	499	239	233,8	1700
14 ^h 00 ^m	490	230	228,4	1680
30	489	229	228	1670
15 ^h 00 ^m	490	230	229	1670
30	485	223	224	1655
16 ^h 00 ^m	469	209	215	1610
30	461	201	200	1670
17 ^h 00 ^m	465	205	206	1650
30	447	187	187,8	1655
18 ^h 00 ^m	400	140	140	1660
30	323	83	83,5	1650
19 ^h 00 ^m	280	20	19,9	1670
30	290	30	30	1660
20 ^h 00 ^m	275	15	15	1660
30	270	10	9,9	1680
21 ^h 00 ^m	275	15	14,6	1700

Avec les balais en argent nous avons relevé les courbes dans la figure 9. La courbe I₂ montre la diminution de

l'intensité lorsque le collecteur tournait sec et I_1 représente la courbe relevée lorsque le collecteur était graissé régulièrement (Tableau IV). Le temps nécessaire pour que

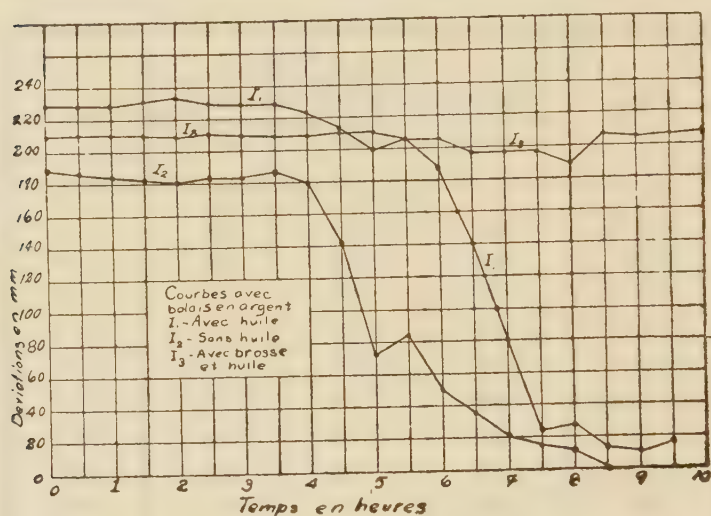


Fig. 9.

les déviations s'annulent était sensiblement le même dans les deux conditions. La différence en intensité dans les deux courbes au début était due à la différence de calage des balais dans les deux observations.

4. Nous avons fait aussi des expériences avec plusieurs genres de balais, tel que en cuivre, en nickel, en aluminium, en maillechort et en zinc, mais le même phénomène a été observé. La figure 10 montre deux courbes I_n et I_{n1} , relevées avec des balais en nickel dans les mêmes conditions sauf que les positions des balais n'étaient pas les mêmes. On sait que le nickel est magné-

tique mais nous l'avons employé pour l'étude du phénomène seulement. La forme de ces courbes ressemble à celle obtenue avec les balais en argent.

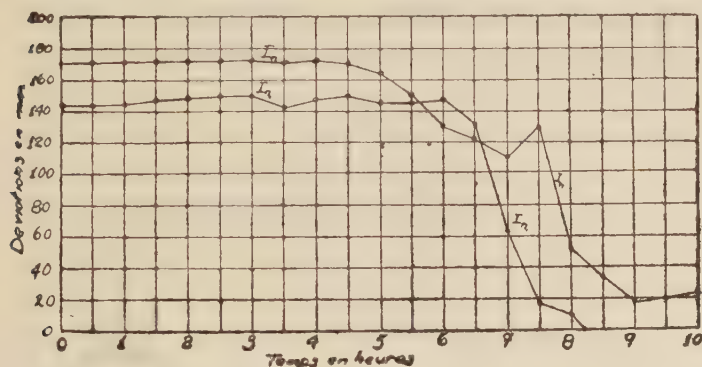


Fig. 10.

Des balais avec des roulettes ont été construits mais le résultat a été plus mauvais que les autres. A ces derniers balais il était nécessaire de donner une pression très grande sur le collecteur pour réaliser une déviation du galvanomètre appréciable.

5. Pour vérifier que la cause de la disparition du courant n'est pas due aux contacts défectueux entre les balais et les collecteurs, et aux mauvaises connexions électriques nous avons employé un galvanomètre différentiel comme M. Maurain nous l'a conseillé. La figure 11 montre le schéma du montage avec ce galvanomètre. Le cadre C avec le collecteur et ses balais b_1 et b_2 est relié en série avec un des cadres du galvanomètre G. R_a représente une résistance variable et S_2 et S_1 sont des shunts variables permettant de régler l'équilibre du galva-

nomètre. L'accumulateur A fournit la force électromotrice nécessaire. On cherche d'abord l'équilibre des deux cadres du galvanomètre lorsque l'induit ne tourne pas. Ayant trouvé cette condition on fait tourner l'induit et

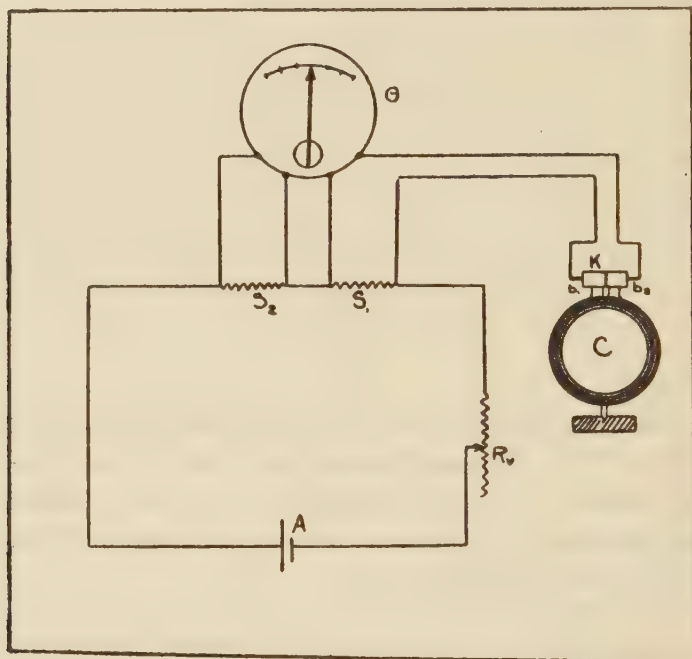


Fig. 11. — Schéma du Montage avec galvanomètre différentiel.

le galvanomètre indique une certaine déviation qui dépend du calage des balais et de la vitesse de rotation. On observe cette déviation qui reste stationnaire ⁽¹⁾ pendant, quelque temps, puis diminue lentement jusqu'à zéro.

⁽¹⁾ La déviation n'est pas tout à fait stationnaire car la vitesse du moteur n'est pas bien constante.

Si la cause de la disparition du courant est due aux contacts défectueux entre les balais et les collecteurs, ou aux mauvaises connexions électriques, on verrait qu'il y aurait une forte déviation à une certaine direction connue parce qu'il n'y a plus d'équilibre entre les deux cadres du galvanomètre ; c'est-à-dire, que le courant passera dans le deuxième cadre seulement. Nous avons constaté que la décroissance de la déviation possède les mêmes caractéristiques signalées plus haut.

Bien que la force électromotrice créée par l'induit soit faible, la disparition du courant n'est pas entièrement due à cette faiblesse parce que quand on augmentait la différence du potentiel aux bornes de l'induit au moyen de la résistance variable la disparition se produisait encore. Nous avons fait des expériences avec une tension aux bornes de l'induit de 5 à 150 millivolts, mais le même phénomène persistait.

6. D'après nos observations nous avons localisé la place où le phénomène se passe. Elle est entre le collecteur et les balais. Il nous reste donc à considérer comme causes probables de cette diminution du courant que deux hypothèses qui peuvent produire le même phénomène.

Ce sont les suivantes :

1^o La naissance d'une nouvelle force électromotrice de direction opposée à celle de l'induit entre les balais et le collecteur.

2^o La variation de résistance qui se produit entre les balais et le collecteur par suite de leur frottement.

Dans la première hypothèse nous pouvons considérer

comme sources de forces électromotrices nouvelles les suivantes :

- a) La force électromotrice thermo-électrique.
- b) La force électromotrice de polarisation.

7. Les phénomènes thermo-électriques ne jouent pas un rôle important. Le frottement des balais sur le collecteur peut donner lieu à des variations de température qui risquent d'introduire des forces thermo-électriques étrangères au phénomène, mais même si ces forces thermo-électriques jouaient un rôle il devrait persister cependant un courant électrique que le galvanomètre devrait indiquer. Enfin pour étudier l'effet de la variation de la température nous avons soudé aux deux extrémités d'une plaque de cuivre avec du laiton, deux fils en cuivre et ensuite les deux extrémités de ceux-ci étaient reliées aux bornes du galvanomètre employant la sensibilité égale à celle dans l'expérience avec l'induit tournant. L'une de ces soudures a été chauffée jusqu'à la température de sa fusion, mais malgré cette différence élevée de la température on a observé que la déviation du galvanomètre a été à peine un millimètre. En plus comme on verra plus loin, la cause de la disparition n'est pas le courant thermo-électrique dû au frottement des balais sur le collecteur.

8. Les caractéristiques du phénomène de la disparition du courant ressemblent en beaucoup de points au phénomène de polarisation électrolytique. Rappelons ici que lorsqu'on met les électrodes d'un voltamètre en série

avec une source de *f. e. m.*, par exemple, un accumulateur, et un galvanomètre, un courant, dont l'intensité *I* est déterminée par la loi d'Ohm, passe par le galvanomètre. Mais après quelques instants l'intensité du courant diminue très rapidement jusqu'à s'annuler car une force électromotrice de polarisation apparaît et a une direction opposée à celle de l'accumulateur. Avant l'apparition de force électromotrice de polarisation nous avons l'expression

$$I = \frac{E}{R}$$

R étant la résistance totale du circuit comprenant aussi la résistance intérieure du voltamètre. Après l'apparition de polarisation nous avons ⁽¹⁾

$$I = \frac{E - e}{R}.$$

car *e* étant la *f. e. m.* de polarisation a une direction opposée à celle de *E*. *I* devient nulle lorsque *e* est égale à *E*.

Les caractéristiques du phénomène de polarisation sont analogues au notre jusqu'ici. Lorsqu'on retire le voltamètre du circuit et le relie ensuite directement à un galvanomètre ce dernier montre qu'il existe un courant dans le voltamètre à une direction opposée à celle du courant *I*. Mais nous n'avons pu reproduire cette observation avec notre appareil. Lorsque l'intensité du courant de l'induit devient égale à zéro, le moteur est arrêté et par conséquent la *f. e. m.* est nulle. Si la dispa-

(1) CHWOLSON, *Traité de Physique*, t. IV, p. 679.

rition du courant est dûe à la polarisation qui se produit entre les balais et le collecteur, on devrait observer un courant opposé à celui de l'induit, mais nul n'a été observé. En plus, nous avons fait des expériences avec le circuit ouvert pendant que l'induit tournait comme d'habitude pour quelques heures. Lorsque le circuit était fermé nous avons observé que l'intensité du courant dans le galvanomètre était une fraction seulement de celle au début de l'expérience, et si le circuit était ouvert encore pour continuer l'expérience on verra l'intensité deviendra égale à zéro. D'après ces observations nous avons conclu que la disparition du courant n'est pas dûe au phénomène de polarisation ni aux modifications physiques ou chimiques, qui se produisent entre le collecteur et les balais, par le passage du courant électrique.

9. Considérons maintenant la deuxième hypothèse. Cette hypothèse de la variation de résistance entre les balais et le collecteur peut produire aussi le phénomène de la disparition du courant. Nous allons considérer d'abord la résistance au contact. Cette résistance dépend d'une série de facteurs ⁽¹⁾ :

- Densité de courant sur la surface de contact du balais ;
- Vitesse périphérique du collecteur ;
- Pression et nature des balais ;
- Poids et élasticité des porte-balais ;

⁽¹⁾ ARNOLD, *La Machine Dynamo*, t. I, p. 534, 1904 ; BARBILLION et BERGEON, *Les Machines Dynamos à courant continu*, p. 267, 1921.

Nature de la surface de contact ;

Vibrations de la machine ;

Rotation bien cylindrique du collecteur.

La résistance superficielle de contact des balais à vitesse angulaire et pression constante varie presque en raison inverse de la densité de courant. Cette résistance diminue quand la pression augmente et le polissage et le graissage du collecteur l'augmente légèrement. Les vibrations de la machine et le faux rond du collecteur l'augmentent aussi. Pour une pression donnée et une densité de courant faible la résistance croît très rapidement et reste constante pour des vitesses de 2 mètres par seconde et au delà.

Analysant ces facteurs nous ne pouvons en tirer aucune explication sur la disparition du courant, car ces facteurs étant constants dans nos expériences l'intensité devrait être constante aussi, ce qui n'était pas le cas.

10. Examinons pourquoi, lorsqu'on nettoie le collecteur sur l'endroit où les balais ont frotté, l'intensité du courant monte à sa valeur normale. Il n'y a pas de doute que le phénomène se passe entre le collecteur et les balais. Il ne reste que deux choses à considérer qui peuvent expliquer le fait que lorsqu'on nettoie le collecteur l'intensité reprend sa valeur normale. Ce sont les suivantes :

1° La formation d'un court circuit entre les lames du collecteur par une couche très mince des particules conductrices du collecteur et les balais déposées sur les touches isolantes par suite du passage des balais. Ce

TABLEAU V

Déviations. Balais en argent avec brosse et graissage

Temps 3-12-29	Lecture sur l'échelle Zero du galv. — 250	Déviations en mm.	Déviations corrigées pour la vitesse 1660 t/min.	Tours-min.
10 ^h 30 ^m	460	210	210	1650
11,00	460	210	210	1650
30	461	211	211	1650
12 ^h 00 ^m	460	210	210	1650
30	465	215	211	1680
13 ^h 00 ^m	459	209	209	1650
30	459	209	210	1640
14 ^h 00 ^m	460	210	210	1650
30	460	210	209	1660
15 ^h 00 ^m	460	210	209	1660
30	463	213	210	1670
16 ^h 00 ^m	465	215	210	1690
30	460	210	205	1690
17 ^h 00 ^m	460	210	205	1690
30	449	199	195	1680
18 ^h 00 ^m	450	200	195	1690
30	448	198	196	1665
19 ^h 00 ^m	443	193	188,5	1690
30	456	206	206	1650
20 ^h 00 ^m	456	206	204	1670
30	458	208	207	1660

court circuit sert comme un shunt ayant une résistance très petite en comparaison avec celle du galvanomètre

et par conséquent la plus grande partie du courant ne passe plus par le galvanomètre ;

2° La formation sur le collecteur et les balais par suite de leur frottement d'une couche très mince d'une nouvelle substance mauvaise conductrice, par exemple d'oxyde.

Nous avons remarqué dans nos expériences que lorsqu'on touche l'endroit sur le collecteur ou les balais n'ont pas frotté la déviation ne revient pas, mais si l'on touche la partie du collecteur ou ils ont frotté elle revient tout de suite. Comme nous l'avons signalé dans plusieurs endroits de cette discussion, le phénomène de la disparition du courant se passe sur le collecteur où les balais ont frotté. Lorsque la déviation est devenue nulle on voit nettement sur le collecteur les traces du frottement d'aspect noirâtre et sur les touches les dépôts des poussières de cuivre très minces.

11. Nous avons cru d'abord qu'un court circuit s'établissait entre les lames du collecteur et qu'il ne parvenait plus de courant au galvanomètre car ce court circuit entre les lames du collecteur formerait un shunt avec une résistance très petite en comparaison à celle du galvanomètre.

Pour remédier à ce défaut nous avons utilisé une brosse circulaire qui tourne en sens inverse de celui du collecteur. Par ce dispositif les courbes I_4 dans la figure 8 et I_3 dans la figure 9 ont été obtenues. Dans ces expériences le réglage du frottement de la brosse jouait un rôle très important. Si le frottement est moindre le nettoyage est imparfait et par conséquent on observera

aussi le phénomène de la disparition du courant. Si la pression de balais sur le collecteur est moindre on observera que la déviation oscille. Il faut que la pression de la brosse sur le collecteur soit forte pour nettoyer celui-ci.

M. Dunoyer nous a conseillé de construire un collecteur comme dans la figure 12 pour voir si la cause de la

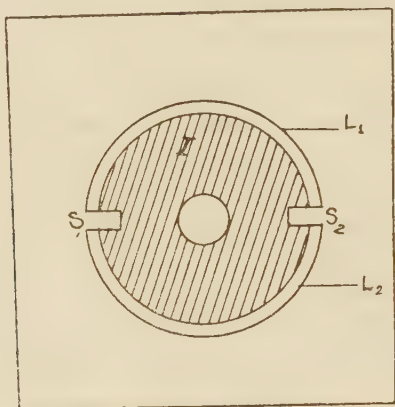


Fig. 12.

disparition du courant est due au court-circuit entre les lames. Les deux sections où lames L_1 et L_2 sont séparées par les espaces S_2 et S_1 de manière que le court-circuit ne s'établisse pas entre les deux sections pendant le passage des balais. Mais avec ce dispositif nous avons remarqué aussi le même phénomène de disparition du courant.

12. Quand la déviation était devenue nulle le moteur était arrêté et la résistance totale entre les balais est mesurée au moyen d'un pont de Wheatstone, mais nous n'avons pu constater aucune variation appréciable de la

résistance. Plusieurs mesures ont été faites aussi avec le collecteur ordinaire et les différences entre la résistance totale et la résistance mesurée ne dépassaient pas 1 Ohm. Nous avons essayé aussi de faire les mesures de la résistance lorsque l'induit est en marche mais il était très difficile d'obtenir l'équilibre du pont car le spot oscillait d'un côté à l'autre et nous n'avons pas obtenu de résultats reliables. En plus, même quand la déviation paraissait nulle un courant de faible intensité circulait encore, qui pouvait fausser la détermination de la résistance. Néanmoins les mesures ont montré que la résistance en marche est plus grande que celle quand l'induit est arrêté.

13. Pour voir si on peut reproduire ce phénomène et afin de mesurer la résistance en marche, nous avons construit un dispositif (fig. 13) qui consiste en une roue en cuivre r , solidaire d'un arbre et une poulie p entraînée par un moteur électrique. Sur la roue frottent les deux contacts ou balais b_1 et b_2 . Ce dispositif forme un bras du pont de Wheatstone. On ferme le circuit avec le commutateur K et l'on cherche l'équilibre avec les résistances R_1 , R_2 , R_3 , et R_4 lorsque la roue ne tourne pas. Une fois l'équilibre établi on fait tourner la roue et on voit que le pont reste en équilibre pour quelque temps. S'il y avait un changement de résistance de contact entre les balais et la roue tournante on observerait le déséquilibre du pont. Les balais en argent ont été employés d'abord. A notre étonnement après une demi-heure d'observation le pont n'était plus en équilibre et la ré-

sistance du bras R_4 qui comprend la roue tournante augmentait. Après trois heures de marche nous avons remarqué tout à fait le même phénomène et ses caracté-

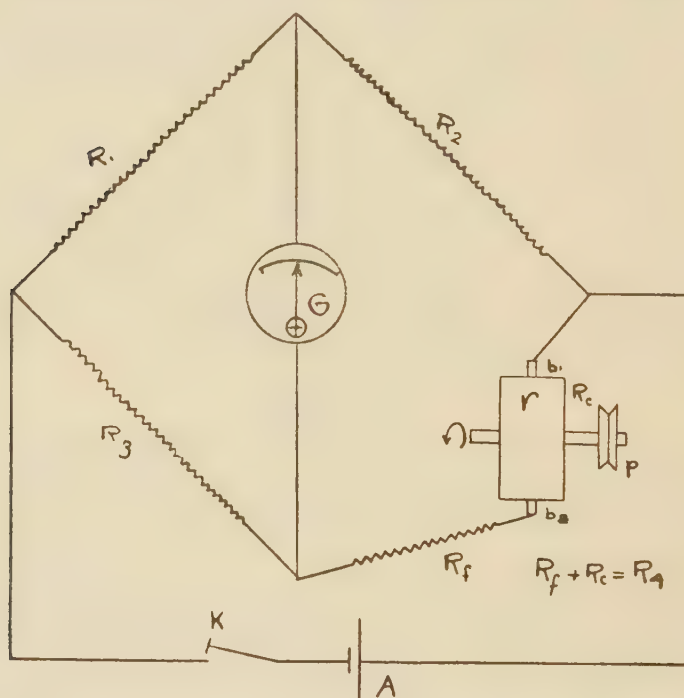


Fig. 13. — Schéma pour l'étude de la variation de la résistance R_c de contact.

ristiques. Après quatre heures de marche la résistance augmentait jusqu'à 4.500 ohms. Nous avons remarqué encore ici que lorsqu'on nettoie la roue à l'endroit où les balais ont frotté, l'équilibre se rétablit. Le tableau VI montre l'observation typique de l'expérience avec les balais en argent. Dans la figure 14 on verra de l'augmentation de résistance en fonction du temps. I.

représente l'augmentation de la résistance avec les balais en charbon tandis que I_a et I_n montrent respectivement l'augmentation avec les balais en argent et en nickel. I_{a_2} représente la variation de résistance lorsqu'une brosse frotte sur la roue graissée par l'huile de vaseline.

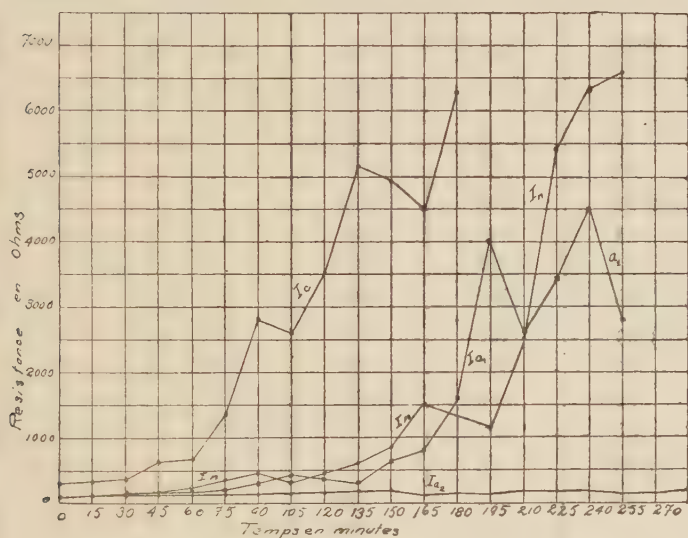


Fig. 14.

Nous avons répété l'expérience en recouvrant la roue par une lame d'argent de 0,6 mm. en épaisseur et en employant des balais en même métal, mais nous avons constaté le même phénomène. Dans la même façon nous avons fait des expériences avec la roue recouverte par une lame de zinc et des balais en même métal, mais le même phénomène a été observé.

TABLEAU VI

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

R_4 étant la résistance du bras qui contient les balais

$$N = 1850 \text{ t/m.}$$

Temps 18-12-29	$R_1\omega$	$R_2\omega$	$R_3\omega$	$R_4\omega$
16 ^h 30 ^m	100	100	100	100
45	100	100	115	115
17 ^h 00 ^m	100	100	153	153
15	150	150	174	174
30	150	150	155	155
45	150	150	179	179
18 ^h 00 ^m	150	150	267	267
15	150	150	470	470
30	150	150	380	380
45	150	150	281	281
19 ^h 00 ^m	150	150	631	631
15	300	300	732	732
30	300	300	1510	1510
45	300	300	4070	4070
20 ^h 00 ^m	300	300	2644	2644
15	300	300	3420	3420
30	300	300	4500	4500
45	300	300	2750	2750

14. Il est intéressant de signaler aussi notre expérience avec les contacts en mercure. La figure 15 montre le schéma du montage. C'est encore un pont de Wheatstone dans un bras duquel se trouve un dispositif qui

consiste en deux disques minces r_1 et r_2 de cuivre solidaire avec un arbre et poulie P entraînée par un moteur électrique. Les disques r_1 et r_2 tournent dans les cu-

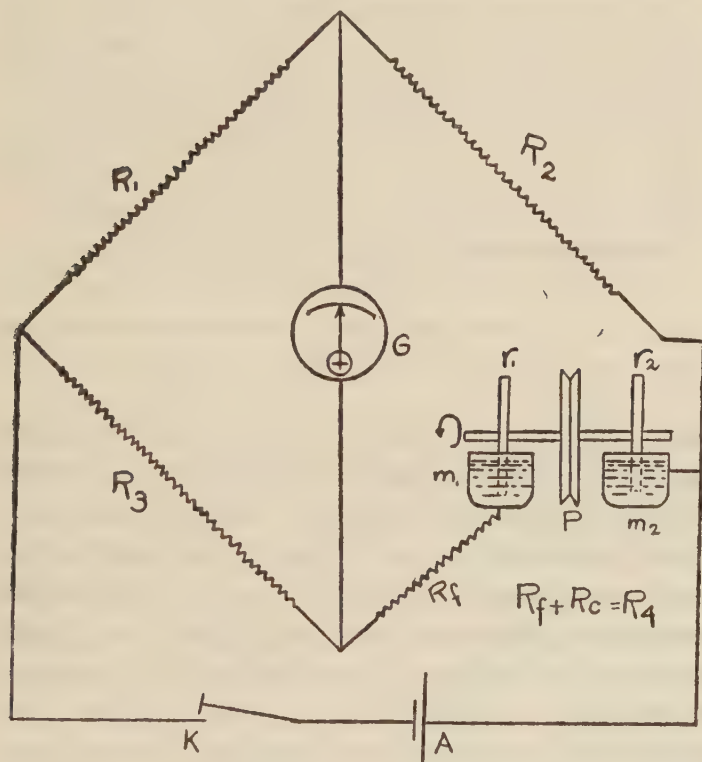


Fig. 15. — Schema pour l'étude de la variation de la résistance R_c de contact.

vettes m_1 et m_2 qui contiennent le mercure. Avec ces dispositifs nous avons observé aussi une augmentation de résistance après 4 heures de marche et lorsqu'on nettoie les disques, la résistance disparaissait. La courbe dans la figure 16 montre la variation de la résistance.

15. Pour préciser plus étroitement la vraie nature de l'origine de cette résistance nous avons fait des expériences avec le circuit ouvert en employant le même dis-

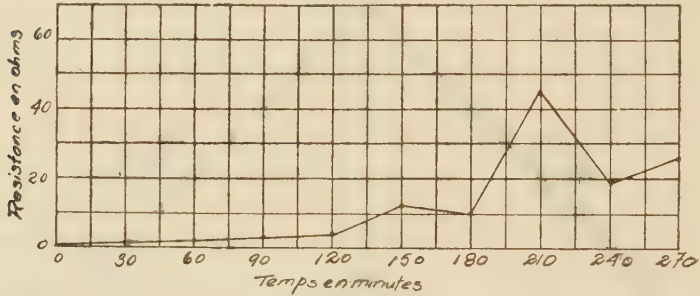


Fig. 16. — Courbe de la variation de résistance du contact de cuivre et de mercure.

positif comme dans la figure 13. Ayant établi l'équilibre du pont on laisse le circuit ouvert et chaque 15 minutes on ferme le circuit pour mesurer la résistance du bras R_4 . Nous avons constaté que la résistance augmentait nettement après quelques heures. La forme des courbes obtenues est identique à celles de la figure 14. D'après les courbes on voit que l'augmentation de la résistance en fonction du temps n'est pas linéaire, mais de la forme $R = t^n$, la valeur de n dépendant de nombreux facteurs tels que la qualité et la nature des balais, la surface de contact, la pression sur le collecteur et la vitesse de rotation.

16. Notre conclusion est que ce phénomène se produit par suite d'une augmentation de résistance entre les balais et les collecteurs. Celle-ci est indépendante du

passage du courant électrique car elle se produit même lorsque le circuit est ouvert. C'est encore une autre preuve que la polarisation ne joue aucun rôle dans ce phénomène. Cette résistance doit être produite par le *frottement mécanique* entre les balais et le collecteur. Nous allons considérer deux hypothèses qui peuvent expliquer l'augmentation de la résistance par le frottement mécanique :

D'abord l'hypothèse de la formation d'une nouvelle substance, mauvaise conductrice et ensuite la formation sur le collecteur d'irrégularités qui peuvent rendre le contact mauvais. Nous avons cru d'abord que par suite du frottement des balais sur le collecteur une substance mauvaise conductrice telle qu'un oxyde se forme sur le collecteur. La possibilité de la formation d'oxyde sur le collecteur est facile car par frottement le collecteur chauffe et comme on le sait la chaleur facilite l'oxydation. Le collecteur étant en cuivre s'oxyde même à la température ordinaire et nous avons observé pendant l'expérience que la température du collecteur était assez élevée. Lorsque le dépôt d'oxyde augmentait sur le collecteur la résistance du contact augmentait aussi et par conséquent le courant diminuait. Lorsqu'on nettoyait ce collecteur et les balais le courant revenait à sa valeur normale.

17. Sur le conseil de M. Maurain nous avons fait des examens microscopiques des balais et du collecteur avant et après l'expérience. Le collecteur et les balais ont été nettoyés et leurs surfaces ont été mises sous un

microscope spécial pour les surfaces opaques et on notait l'aspect des surfaces. Ayant fait ces observations on faisait tourner l'induit jusqu'à ce que la déviation descendit à zéro. Prenant la précaution de ne pas toucher les surfaces du collecteur et des balais, on les mettait sous le microscope. Avec un grossissement de 80 fois, nous avons observé nettement sur le collecteur où les balais ont frotté une trace noirâtre, formée par plusieurs bandes les unes rouges, les autres d'un noir gris. Si l'on examinait les surfaces des balais on observait exactement les mêmes caractéristiques. Avec les différents balais essayés, tel que en charbon et en argent, on a observé, le même aspect. Les caractéristiques observées étaient analogues à celle de l'oxyde de cuivre ⁽¹⁾. La partie rouge correspondait à l'oxyde cuivreux et la noire-grise au protoxyde. L'oxyde cuivreux chauffé dans l'air, noircit en se changeant en oxyde cuivrique. Grondahl et Griger ⁽²⁾ ont découvert que l'oxyde de cuivre possède une conductibilité unilatérale, le courant passant plus facilement de l'oxyde vers le cuivre que dans le sens inverse. La résistance varie dans le rapport de 1 à 1000 selon que le courant passe de l'oxyde au métal. D'après cette propriété de l'oxyde de cuivre ils ont construit des redresseurs de courant alternatif pour la charge des accumulateurs de 2, 4 et 6 volts et même jusqu'à 200 volts. L'épaisseur de l'oxyde employé n'est pas de plus de 0.038 mm. Jusqu'ici l'hypothèse de l'augmentation de la résistance due à la for-

⁽¹⁾ DITTE, *Leçons sur les métaux*. Vol. II, p. 530.

⁽²⁾ GRONDAHL and GRIGER, *A New Electric Rectifier*, *Am. Inst. Elect. Eng.*, t. 46, pp. 215-222, 1927 ; *Engineering*, 124, pp. 615-616, 1927.

mation d'oxyde sur le collecteur explique bien le phénomène de la disparition du courant.

18. D'après les courbes de la figure 14 la résistance montait jusqu'à 6.500 ohms après 4 heures de marche, la résistance étant mesurée lorsque la roue tournait. Mais la chose la plus curieuse était que lorsque la roue était arrêté, la résistance mesurée était sensiblement égale à sa valeur au début de l'expérience. Si la couche d'oxyde existait réellement on aurait dû observer la même résistance lorsque la roue était arrêtée. Cette résistance se manifestait seulement pendant la marche. Mais la présence de cette résistance est hors de doute car si l'on mesure la résistance quand la roue est en mouvement, puis arrêtée sans la nettoyer, on observera lorsque l'expérience sera répétée après 24 heures d'arrêt, en mettant en marche la roue, que la résistance est égale à celle mesurée 24 heures avant.

19. Pour préciser le rôle de l'oxyde nous avons construit un collecteur et des balais en argent. On sait que l'argent ne s'oxyde pas à la température ordinaire. Mais, si l'on élève la température l'oxydation se produit aussi. L'oxyde d'argent faiblement exothermique se décompose de sorte que si l'on élève la température de plus en plus pour faciliter l'oxydation, l'on approche du point de décomposition. Mais malgré cette propriété de l'argent, nous avons observé la disparition du courant avec le collecteur et les balais en argent.

20. Enfin pour décider une fois pour toutes le vrai rôle de l'oxyde, M. Dunoyer nous a conseillé de faire des expériences avec une roue et des contacts en platine, car le platine ne s'oxyde pas dans l'air, ni dans l'oxygène, à n'importe quelle température. Le montage du dispositif pour ces expériences était exactement celui de la figure 13. Les balais utilisés étaient en platine. Une petite roue était recouverte d'une mince lame de platine et on la plaçait en série dans un bras du pont de Wheatstone. Nous avons suivi la même méthode d'observation que dans les expériences précédentes. Les courbes AA et BB (fig. 17) montrent la variation de la résistance en

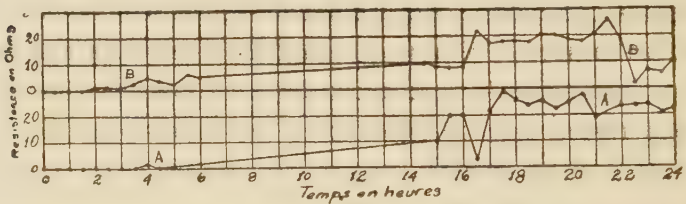


Fig. 17.

fonction du temps. En comparant les courbes obtenues, avec la roue et les contacts en platine à celles obtenues avec la roue en cuivre et les contacts en charbon, en nickel et en argent (fig. 14) on voit que la variation de résistance avec les contacts en platine est beaucoup plus faible. La valeur de l'augmentation de la résistance mesurée dans la figure 14 était 6.500 ohms après 4 heures de marche, tandis que, avec les contacts en platine l'augmentation de résistance était de 30 ohms seulement après 24 heures de marche.

La courbe BB était relevée dans les mêmes conditions

que AA. Les parties rectilignes des courbes, sans points relevés, représentent les heures où l'observateur a cessé de noter l'observation de chaque demi-heure. Comme dans nos autres expériences la résistance disparaissait lorsque la rotation était arrêtée. D'après ces expériences on voit que l'oxyde joue un rôle très important.

21. M. Dunoyer nous a conseillé d'étudier aussi le rôle des vibrations des balais sur la roue, vibrations dues

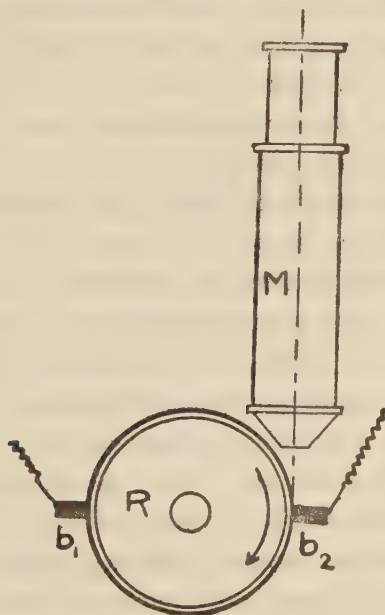


Fig. 18.

aux irrégularités de la périphérie qui proviennent des frottements mécaniques. Pour ces expériences nous avons employé un microscope M (fig. 18) pour étudier le

mouvement des contacts et le phénomène qui se passait pendant que la roue R était en mouvement. La roue R avec les contacts b_1 et b_2 étaient compris dans un bras du pont de Wheatstone comme le montage à la figure 13. Nous avons employé le microscope pour examiner l'aspect de la roue et les contacts avant, pendant, et après l'expérience. On réglait l'équilibre du pont, on examinait la nature de la surface de la roue et les contacts. Ayant fait ces observations préliminaires, on faisait tourner la roue et l'on observait la nature du contact entre les balais et la roue pendant que la résistance était encore zéro. Comme M. Dunoyer nous l'avait indiqué, nous avons pu voir à travers le contact dû aux vibrations des balais. Nous avons observé ce fait très nettement avec un grossissement de 30 fois. Au commencement de l'expérience la résistance du contact était zéro même quand les balais étaient en vibration. Après 4 heures d'observation nous avons observé que la résistance augmentait déjà de 3.430 ohms, et en examinant les contacts par le microscope pendant que la roue était en marche nous n'avons pu constater aucune différence entre les vibrations des balais au commencement de l'expérience et à la fin. Ayant arrêté la rotation de la roue nous avons observé que la surface de celle-ci était couverte de particules noirâtres. En tournant lentement la roue on voit ces particules très petites passer sous le balais. Elles peuvent être des petites particules de la roue elle-même arrachées par le frottement des balais, ou des saletés, probablement de l'oxyde.

Lorsque la rotation était arrêtée la résistance reve-

nait à sa valeur primitive. Cette résistance se manifestait donc seulement pendant la marche du contact tournant, nous l'appelons la « résistance cinétique ». Si l'irrégularité sur la périphérie de la roue est semblable à celle de la périphérie d'une meule, lorsqu'on nettoie la roue en marche, la résistance ne sera pas diminuée, car cette irrégularité fait corps avec la masse de la roue. Il est hors de doute que la vibration des balais joue un rôle important dans l'augmentation de résistance du contact, mais comme l'expérience suivante, le montrait, la disparition du courant ne dépend pas seulement de la vibration des balais.

22. Pour supprimer la vibration des contacts nous avons construit un dispositif très simple (fig. 19) qui consistait en deux supports S_1 et S_2 , une poulie P solidaire avec l'arbre AA. Les supports S_1 et S_2 étaient en cuivre avec dans leurs parties supérieures deux trous juste assez grands pour laisser passer l'arbre AA de fer sans aucun jeu possible. La poulie P était entraînée par un moteur électrique. Ce dispositif était compris dans un bras du pont de Wheatstone. Les ressorts R assuraient en plus la pression de l'arbre dans les supports. La flèche (fig. 19) montre le chemin du courant et R_1 et R_2 sont deux résistances du pont. Les supports S_1 et S_2 étaient fixés sur la planche BB en bois. Etant assuré que l'arbre rigide ne pouvait pas vibrer dans les trous des deux supports, les expériences ont été faites avec la même méthode d'observation que les précédentes. La résistance initiale était nulle. Nous avons observé

qu'après 4 heures la « résistance cinétique » mesurée était égale à 1025 ohms, mais cette fois-ci lorsque la rotation de la roue était arrêtée nous avons pu mesurer une résistance permanente égale à 32 ohms. Nous avons

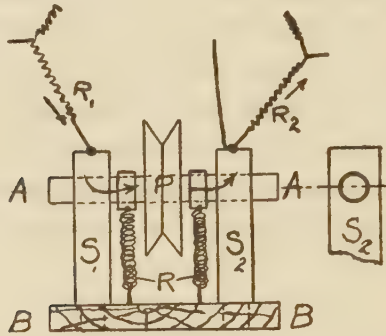


Fig. 19.

répété la même expérience après le nettoyage de l'arbre et des trous avec de l'essence et nous avons toujours trouvé une résistance permanente qui était une fraction seulement de la « résistance cinétique » pendant que la roue était en marche. C'est avec ce dispositif seulement que nous avons pu constater une résistance lorsque la roue était arrêtée. L'explication de ce fait est qu'il y avait accumulation d'une substance isolante quelconque entre l'arbre et les supports et qu'elle empêchait le passage du courant. Cette substance devait être l'oxyde ou des saletés qui se formaient entre l'arbre et les supports par leur frottement mécanique. Le frottement se produisait à l'intérieur des trous et par conséquent l'oxyde ou les poussières pouvaient s'y accumuler, tandis que dans le cas de la roue avec les balais

comme contacts, la substance isolante ne pouvait pas s'accumuler en quantité considérable sur la périphérie libre de la roue ; en effet cette substance isolante pouvait tomber ou s'arracher par force centrifuge si sa quantité augmentait. Nous avons constaté que l'augmentation de résistance lorsque l'arbre ne tournait pas, était $\frac{1}{32}$ seulement de la valeur de la « résistance cinétique ».

23. Enfin d'après ces nombreuses expériences et observations nous avons conclu que la disparition du courant est un phénomène très compliqué dans lequel

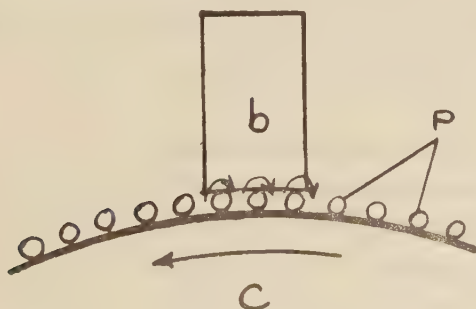


Fig. 20. — Dessin schématique.

plusieurs facteurs entrent en jeu. *Le premier facteur* qui joue un rôle important est la formation d'oxyde et de saleté, sur la surface des contacts tournants, qui empêche le passage du courant comme nous l'avons démontré dans le cas du dispositif de la figure 19. *Le deuxième facteur* provient de ce que par suite du frottement mécanique entre les balais et les collecteurs, ou la roue,

des petites particules sont arrachées et lorsque le collecteur tourne, ces particules P (fig. 20) avec l'oxyde sont animées d'un mouvement de rotation sous le balais *b*. La mobilité de ces particules empêche le bon contact entre les balais et le collecteur ; lorsque la roue est arrêtée ces particules deviennent immobiles et les contacts redeviennent bons. *Le troisième facteur* est la conséquence des deux premiers. Ces particules de métal ou d'oxyde et les irrégularités sur la périphérie des collecteur peuvent mettre les balais en vibration comme M. Dunoyer nous l'a signalé et par conséquent pendant que le collecteur tourne la résistance au contact est grande car les balais entrent en vibration. L'ensemble de ces trois facteurs explique bien la nature du phénomène de la disparition du courant.

24. De ces expériences résulte la loi suivante :

« Tous les contacts — tournants ou glissants — entre métaux, ou métal et charbon, ou métal et mercure et plus généralement entre des conducteurs quelconques peuvent par leur frottement mécanique produire une résistance soit cinétique soit permanente au passage du courant ». On appelle résistance cinétique la résistance qui se manifeste seulement lorsque les contacts sont en mouvement. La résistance permanente est celle qui se manifeste lorsque les contacts sont au repos.

25. Voici une autre expérience que nous avons faite pour étudier la relation entre la disparition du courant et la tension entre les balais. La roue des expériences

précédentes avec les balais était mise en série avec une résistance extérieure de 400 ohms et un accumulateur de 4 volts. Un galvanomètre shunté montrait le passage du courant. Puis on faisait tourner la roue et on observait qu'après 6 heures la déviation était seulement moitié de celle au début de l'expérience. La résistance augmentait de 100 % car la *f. e. m.* de l'accumulateur ne baissait que très légèrement de quelques millivolts.

26. Le seul dispositif qui nous a donné de bons résultats est la brosse qui frotte sur le collecteur pour empêcher la formation d'une couche d'oxyde. Nous avons signalé nos expériences avec la brosse plus haut. La courbe I_4 dans la figure 8 et I_3 dans la figure 9 montrent nettement la valeur de la brosse pour empêcher la disparition du courant. Dans le chapitre VII on verra des expériences de longue durée avec la brosse. Nous avons pu faire une observation de 70 heures continue sans perdre le courant. La courbe I_3 dans la figure 9 n'est pas une ligne droite et il y a encore une variation faible de résistance due au fait que la brosse nettoie seulement le collecteur tandis que les balais ne sont pas nettoyés directement. Pour remédier à ce défaut nous avons construit un dispositif montré dans la figure 21. La brosse B frotte sur le collecteur C. Toutes les parties sont faciles à comprendre d'après le dessin et par conséquent nous allons décrire seulement le collecteur C. Dans sa forme la plus simple le collecteur C consiste en deux lames ou secteurs l_1 et l_2 situées dans deux plans différents, l'une au-dessus de l'autre,

teur ordinaire, sauf, que sur ce nouveau collecteur deux balais sur chaque porte balais sont nécessaires. Lorsque le nombre de plans augmente le nombre des balais sur chaque porte-balais augmente de la même manière, c'est-à-dire que lorsque les lames sont divisées en deux plans, chaque porte-balais doit avoir deux balais, et s'il y a trois plans il doit avoir trois balais sur chaque porte-balais, etc. La largeur d'isolement dépend du diamètre du collecteur et du nombre de lames. Nous avons signalé en plusieurs endroits de cette discussion que le frottement mécanique entre les balais et le collecteur forme sur les surfaces de ceux-ci des particules d'oxyde, de saleté ou de métal qui tournent sous les balais lorsque le collecteur est en rotation. Ces particules rendent le contact très mauvais et une résistance cinétique est produite. Les vibrations des balais augmentent aussi cette résistance. L'isolant en général ne chauffe pas aisément par frottement comme les métaux et par conséquent ne favorise pas la formation d'oxyde. En plus cet isolant en passant sous les balais nettoie la surface de ceux-ci. Nous allons exposer les autres avantages de genre du collecteur dans le chapitre suivant. Avec le dispositif de la figure 21 nous avons pu relever la courbe A_b (fig. 22) de l'intensité du courant. Lorsque la brosse est supprimée on a observé la variation de l'intensité (courbe A_c) qui n'est pas constante, mais en comparaison avec les autres courbes obtenues, elle présente une durée de temps plus longue sans la disparition du courant. L'explication est que sans la brosse la surface du collecteur n'était pas nettoyée

et le dépôt de l'oxyde, de saleté ou des petites particules de cuivre, qui rendaient le contact mauvais, augmentait et par conséquent le courant diminuait. Le bon

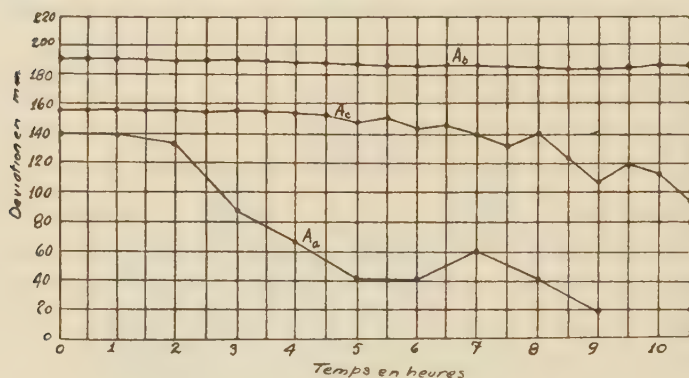


Fig. 22.

fonctionnement de l'appareil dépend de l'efficacité de nettoyage des surfaces du collecteur et des balais. D'après ces observations l'emploi de la brosse est indispensable pour le nettoyage du collecteur.

La courbe A_a (fig. 22) montre la variation de l'intensité avec un collecteur ordinaire et des balais en argent. Ce dispositif a été construit comme nous l'avons signalé dans le paragraphe 19 de ce chapitre.

CHAPITRE VII

INDUIT AVEC NOYAU EN MUMÉTAL OBSERVATIONS DE DURÉE

1. Propriétés du mumétal. — Pour éviter les inconvénients que nous avons cité dans le chapitre V et pour augmenter la force électromotrice et par conséquent la puissance, sans être embarrassant, un induit avec les tôles en mumétal a été construit. Le mumétal, alliage de 80 % de nickel et 20 % de fer doux, possède des propriétés magnétiques très intéressantes dans les champs faibles. Soumis à un champ de 0,2 gauss qui est sensiblement égal à la valeur de composante horizontale du champ terrestre à Paris, la valeur d'induction B est égale à 5.600 gauss ⁽¹⁾. La perte par hystérésis est $\frac{1}{10}$ de celle de fer suédois de la meilleure qualité. D'après la valeur d'induction on voit que la perméabilité ($\mu = \frac{B}{H}$) avec un champ intérieur de 0,2

⁽¹⁾ *Magnetic Alloys, The Telegraph Const. and Maintenance Co-Ltd-London*, pp. 1-9.

gauss est égale à 28.000. Pour développer ces propriétés magnétiques le mumétal doit subir un certain traitement thermique ⁽¹⁾.

2. Traitement thermique des tôles. — Les tôles sont mises après le découpage dans un four électrique et la température est élevée entre 900° et 1 000° C pendant une heure et puis le courant est supprimé. Les tôles refroidissent avec le four. Entre 700° C et 400° C la vitesse de refroidissement est 1,5° C par minute. Les tôles étant refroidies jusqu'à la température ordinaire, on les a recuites encore dans le four pour quinze minutes à la température 600° C. Après ce dernier traitement on les laissait refroidir dans l'air. La vitesse de refroidissement est 20° par seconde. Le traitement était fait après le découpage de tôles, car le mumétal perd une partie de ses propriétés magnétiques lorsqu'on fait un effort après le traitement. Rappelons ici qu'un autre nom pour cet alliage de 80 % de nickel et 20 % de fer doux est permalloy. McKeenan ⁽²⁾ a conclu que la perte par hystérésis du permalloy est presque nulle par suite du groupement particulier d'atomes de cet alliage.

3. Construction de la génératrice. — Le principe de la construction de la génératrice du compas à induction est tout à fait celle de la dynamo bipolaire à courant

⁽¹⁾ ARNOLD and ELMEN, *Journal of The Frank Inst.*, may 1925, p. 588.

⁽²⁾ MCKEENAN, *Magnetostriction. Jour. of the Frank. Inst.*, Vol. 202, p. 757, 1926.

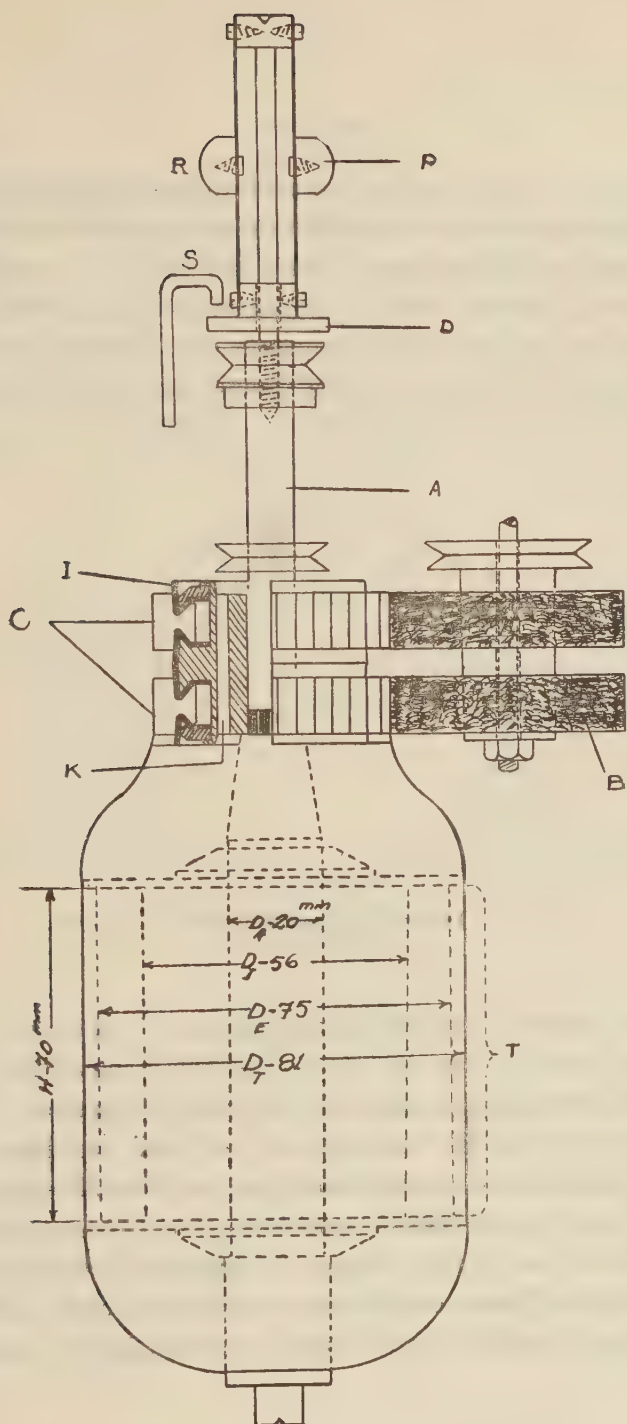


Fig. 23. — Induit monté et le régulateur de vitesse R.

continu, et par conséquent nous n'exposerons pas ici tous les détails de la construction mais nous discuterons les petites différences et l'effet des tôles en mumétal. Dans la construction de la génératrice on ne s'occupe pas des problèmes de l'inducteur des étincelles et de réaction de l'induit car dans l'emploi normal de l'appareil l'intensité est nulle.

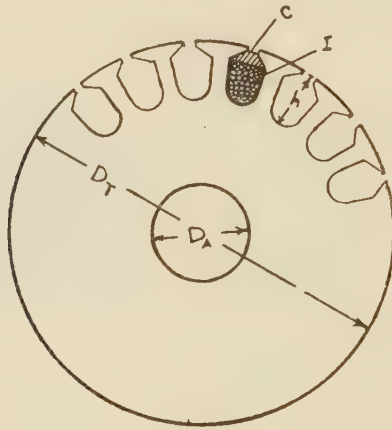


Fig. 24. — Fixation des conducteurs dans les rainures partiellement ouvertes.

La figure 23 montre l'induit monté. T représente la place occupée par les tôles. Les tôles consistent en 255 pièces de mumétal de 0,25 mm. d'épaisseur. La hauteur totale H occupée par les tôles est égale à 70 mm., 64 mm. étant occupé par les tôles elles-mêmes et 6 mm. par l'isolant entre eux. Le diamètre extérieur D_T est égal à 81 mm. Le diamètre extérieur D_E pour le bobinage est 75 mm. tandis que celui de l'intérieur D_I est 56 mm. L'arbre A est en bronze phos-

phoreux et son diamètre D_A dans les tôles est 20 mm. Sur les tôles sont pratiquées 19 rainures, partiellement ouvertes. La figure 24 montre les tôles avec les rainures et la fixation de fils par une clavette C en fibre. I représente l'isolement de fils aux tôles.

4. L'enroulement. — La génératrice a une armature bipolaire à enroulement imbriqué série. Le pas

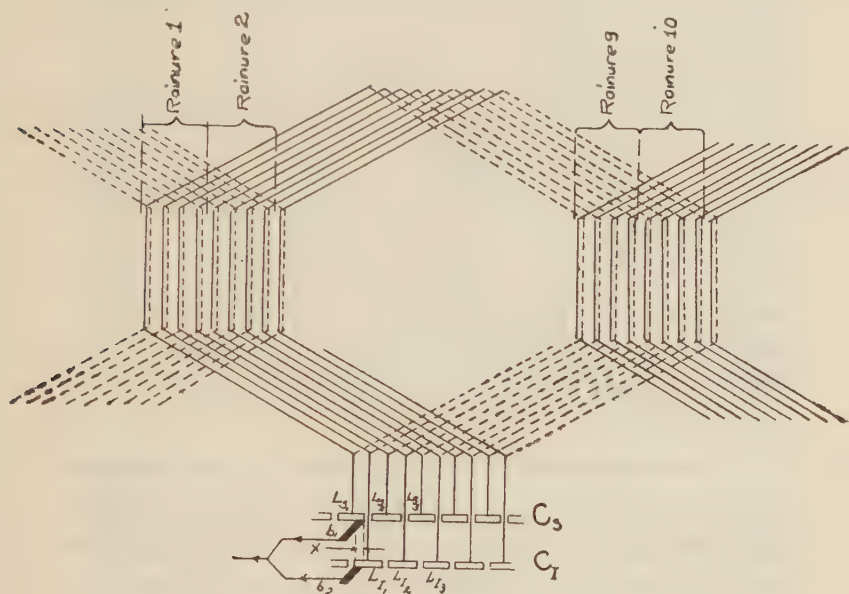


Fig. 25. — Schéma de l'enroulement.

est légèrement raccourci, car le raccourcissement du pas diminue l'induction mutuelle des sections en court-circuit. Dans la figure 25 on voit le schéma de l'enroulement imbriqué série et la répartition des conducteurs dans les rainures. Comme le montre le schéma les bobines

sont reliées ensemble, en passant d'une rainure à l'autre dans l'ordre suivant :

$$\text{Rainures} \left\{ \begin{array}{l} 1 - 9 - 1 - 9 - 1 - 9 - 1 - 9 - \\ 2 - 10 - 2 - 10 - 2 - 10 - 2 - 10 - \\ 3 - 11 - 3 - 11 - 3 - 11 - 3 - 11 - \text{etc.} \end{array} \right.$$

Pour distinguer entre eux les conducteurs d'aller et les conducteurs de retour, les premiers sont représentés dans le schéma par des traits pleins et les seconds par des traits pointillés.

Le nombre total N des conducteurs à la périphérie de l'armature est 8.664 ou 456 conducteurs par rainure. Le nombre total des spires est 4.332, chaque spire comprenant deux conducteurs. Le diamètre des conducteurs est $\frac{20}{100}$ mm. avec deux couches de soie. La résistance entre balais est égale à 193 ohms. Les conducteurs étaient logés dans les rainures avec les précautions habituelles dans la construction d'une dynamo.

5. Les collecteurs et la commutation. — Les sections sont reliées aux deux collecteurs de 38 lames chacun. La liaison des sections (fig. 25) est faite de telle manière que l'extrémité d'une section est liée à une lame L_{s_1} du collecteur supérieur C_s passant par le trou K (fig. 23) tandis que l'autre extrémité est liée à la lame L_{i_1} correspondante du collecteur inférieur C_i . Cette méthode de liaison permet la réalisation d'un grand nombre de sections pour un certain nombre des spires sans agrandir le diamètre du collecteur et sans empêcher la commutation normale. Le nombre des sections étant

grand le nombre des spires par section est moindre et par conséquent l'effet de l'induction mutuelle des sections en court-circuit sera faible ou négligeable. Nous ne discuterons pas ici l'application de ce collecteur double pour les machines à grand débit car c'est son application au compas à induction qui nous intéresse. Comme le montre le schéma (fig. 25) une section est mise en court-circuit par les balais b_1 et b_2 sur les lames L_{s_1} et L_{i_1} . Dans cet arrangement il faut que l'épaisseur des balais β soit plus petit que l'isolement ε entre les lames pour qu'il y aurait une seule section à la fois. La durée de commutation ne dépend pas de l'épaisseur des balais mais de la largeur x (fig. 25) de la superposition des deux lames d'une même section ou bobine. Dans la commutation ordinaire la durée est égale à $T = \frac{\beta - \varepsilon}{V_c}$ (1), V_c étant la vitesse linéaire du collecteur par seconde et en supposant que la largeur d'une lame égale à l'épaisseur des balais. Dans notre cas la durée de commutation est donnée par l'expression $T = \frac{x}{V_c}$ en employant es mêmes signes. L'épaisseur des balais β peut être égale ou plus petite que x , mais la durée de commutation est toujours égale à $T = \frac{x}{V_c}$.

Avec ce dispositif nous avons réalisé 76 sections avec deux collecteurs de 50 mm. de diamètre. Dans nos essais, nous avons observé que lorsque la ligne des balais est la direction Nord-Sud, la position du zéro du

(1) Alfred STILL, *A. I. E. E.*, Vol. XXX, p. 2359.

galvanomètre ne changeait pas lorsque la vitesse de rotation varie de 1.400 à 3.700 tours par minute. L'effet de la dissymétrie accidentelle dans le bobinage et dans la commutation est très faible dans un enroulement avec beaucoup de sections, chaque section comprenant un nombre limité de spires. La dissymétrie dans le bobinage et l'induction mutuelle des bobines peuvent changer la position du zéro lorsque la vitesse de rotation varie.

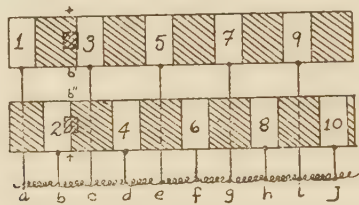


Fig. 26.

On peut réaliser aussi un autre système de liaison de l'enroulement aux lames de collecteur. La figure 26 montre le schéma de la liaison entre les sections et les lames du collecteur. C'est un collecteur ordinaire divisé en deux pour avoir le plus grand isolement entre les lames voisines, afin que les isolants, étant inoxydables par frottement, peuvent nettoyer les surfaces des balais, comme nous avons expliqué dans le dernier chapitre. Prenons par exemple la section *ab*. Une de ces extrémités est reliée à la lame 1 du collecteur supérieur et l'autre extrémité à la lame 2 du collecteur inférieur. On doit avoir deux balais sur chaque porte-balais pour que la commutation passe normalement comme un collecteur unique. Dans la figure 26 on voit

l'instant lorsque la section $b-c$ passe en court-circuit sous les balais b' et b'' étant sur un même porte-balais.

6. Méthode de mesure. — La génératrice était montée sur le même bâti du premier appareil, sauf que nous avons changé les supports, les portes-balais et le graissage du collecteur. Les procédés d'observation et des mesures sont identiques à celles du premier appareil. On fait tourner la génératrice au moyen d'un petit moteur électrique placé à une distance de 2 m. 50 pour que son champ n'agisse pas sur la génératrice. On choisit une vitesse convenable par exemple 2.000 tours par minute. Si la ligne des balais se trouve dans la direction Nord-Sud, on ne verra aucune déviation du galvanomètre et si sa position est différente on verra une déviation à droite ou à gauche selon sa position par rapport au méridien magnétique. On tourne la manivelle jusqu'à ce que l'on trouve la position de balais qui donne la déviation zéro. Dans cette position des balais la commutation se passe lorsque les bobines commuées ne coupent pas le flux terrestre et par conséquent le courant est nul.

7. Pour que la vitesse de rotation de la génératrice ne change pas beaucoup lorsque la vitesse du moteur varie, nous avons construit un petit régulateur de vitesse R à force centrifuge. Les poids P sont fixés aux deux lames d'acier rivées à l'extrémité supérieure du petit arbre, tandis que les bouts inférieurs des lames sont rivés à une rondelle à plateau D. A une vitesse

donnée les poids P s'écartent de leur position normale et tirent le plateau D vers le haut, mais celui-ci est empêché par l'arrêt S de manière que la vitesse ne puisse plus augmenter car la fraction entre le plateau et l'arrêt est proportionnelle à la vitesse. Par un réglage

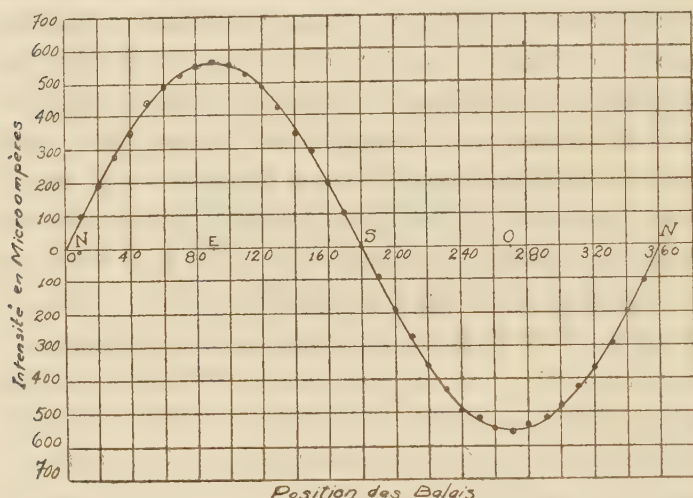


Fig. 27. — Variations de l'intensité et du potentiel avec la position des balais. N = 2.000 t/m. Tôles de l'induit muniées.

convenable de l'arrêt on peut réaliser une vitesse de rotation sensiblement constante, quand même la vitesse du moteur varie. Nous avons employé le régulateur de vitesse pour ne pas toucher l'appareil pendant les longues expériences, car d'habitude on comptait le nombre de tours chaque fois que l'on faisait une lecture. Dans la pratique ce dispositif est commode pour avoir un régime de vitesse constant quel que soit l'avion ou la vitesse de l'avion.

Les brosses B frottent sur le collecteur pour empêcher

l'accumulation de l'oxyde qui empêche le passage du courant. On peut glisser le porte-brosse par une vis de réglage de telle façon que l'on peut régler le frottement des brosses sur le collecteur.

Comme dans les expériences précédentes nous avons fait des mesures de l'intensité en fonction des positions des balais à intervalle de 10 degrés. Sachant la constante du galvanomètre on trouve l'intensité en multipliant la déviation par cette constante. On voit dans la figure 27 la variation de l'intensité en fonction des positions des balais par rapport au méridien magnétique. Il y a deux points où l'intensité est nulle et deux points d'intensité maximum. Dans le relèvement de cette courbe la vitesse de rotation était 2.000 tours par minute et la constante du galvanomètre était 4,8 micro-ampères par millimètre.

8. L'intensité maximum en fonction de la vitesse de rotation a été mesurée par un galvanomètre. Le tableau VII montre le type d'observations faites avec les vitesses de 685 à 3.310 tours par minute. La courbe I dans la figure 28 montre l'intensité maximum en fonction de la vitesse d'après le tableau VIII. Les différences de potentiel ont été mesurées aussi en fonction de la vitesse par la méthode de compensation. Le tableau VIII montre une série de ces mesures avec les vitesses variant de 1.000 jusqu'à 3.000 tours par minute. La courbe V dans la figure 28 est construite d'après le tableau. D'après les deux courbes on calculait la puissance $P = VI$ de la génératrice en prenant

TABLEAU VII

Intensités

Tours par minute	Lecture sur l'échelle Position de Zéro-250	Déviations en mm. δ	Intensité en micro-ampères $\delta \times 4,8$
685	296,2	46,2	222,0
950	305,5	55,5	266,0
1100	315,0	65,0	312,0
1310	330,0	80,0	384,0
1390	337,3	87,3	419,0
1600	348,0	98,0	470,0
1700	350,5	100,5	504,0
1950	365,2	115,2	554,0
2275	381,5	131,5	632,0
2600	397,0	147,0	706,0
3070	434,5	184,0	884,0
3310	448,0	198,0	950,0

TABLEAU VIII

Différences de potentiel

Tours par minute	Différence du Potentiel en millivolts	Tours par minute	Différence du Potentiel en millivolts
1000	48,7	2430	126,5
1435	72,5	2800	146,3
1880	91,0	3100	159,0
2100	105,0	3300	175,4

la valeur de l'intensité et de la différence du potentiel correspondant à une vitesse donnée, on voit que la puissance P , varie de 10 à 180 watts $\times 10^{-6}$ correspondant à des vitesses de 800 à 3.400 tours par minute.

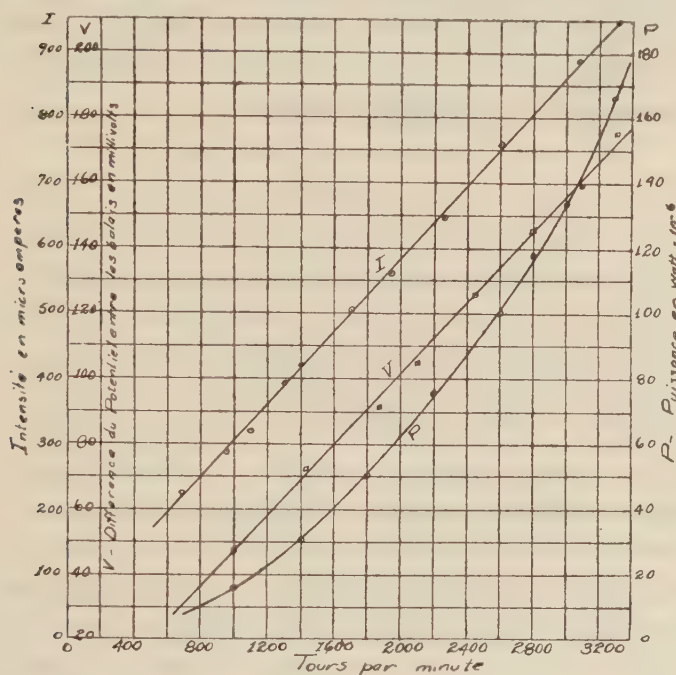


Fig. 28.

9. En passant nous signalons ici les caractéristiques du compas Pioneer à 2.000 tours par minute d'après M. Badin :

F. E. M. = 75 millivolts.

I = 175 micro-ampères.

$P_{\max} = 13 \times 10^{-6}$ watts.

P pour un calage des balais égale à $1^{\circ} = 40 \times 10^{-10}$ watts.

Indicateur = Millivoltmètre Weston de 38 ohms de résistance.

Poids du cuivre = 1 kg. 385.

La sensibilité garantie est 0,4 mm. par degré et 10 mm. pour 30 degrés.

La différence de potentiel entre les balais de notre appareil à 2.000 t/m. est égale à 102 millivolts. Si nous employons le même galvanomètre Weston la résistance totale du circuit sera 231 ohms et par conséquent l'intensité I sera 441 micro-ampère.

$$P_{\max} = VI = 45 \times 10^{-6} \text{ watts.}$$

$$P \text{ pour un calage de balais égale à } 1^{\circ} = 138 \times 10^{-10} \text{ watts.}$$

$$\text{Poids du cuivre} = 366 \text{ grammes.}$$

Si nous faisons une comparaison entre les deux génératrices, on verra d'abord que le poids de cuivre du compas Pioneer est 3,8 fois plus grand que celui du nôtre. Si les fils d'enroulement ont $\frac{20}{100}$ mm. de diamètre, la longueur totale des fils sera 3,8 plus longue et par conséquent la surface totale sera aussi plus grande. Avec une vitesse de 2.000 tours par minute nous avons la puissance maximum égale à 45×10^{-6} watts tandis que celle de Pioneer est 13×10^{-6} watts, autrement dit la puissance de notre génératrice est 3,46 fois plus grande. D'après cette relation la sensibilité sera évidemment 3,46 fois plus grande et l'indication sera 1,4 mm. par degré en employant le même millivoltmètre. Si la vitesse est augmentée jusqu'à 3.200 tours par minute qui n'est pas excessive au point de vue du maintien des bons contacts des balais on aura $120,5 \times 10^{-6}$ watts de puissance disponible et la sensibilité sera 3,71 mm. par degré, qui est équivalente à celle d'un compas magnétique ordinaire de 425 mm. de diamètre.

10. Rendons-nous compte de la valeur de l'induction dans les tôles en mumétal. On peut calculer cette valeur d'induction B d'après les résultats expérimentaux. La force électromotrice d'une dynamo est représentée par l'expression

$$(1) \quad E = \frac{\Phi \cdot N \cdot n \cdot p}{a \cdot 60 \cdot 10^8}.$$

E = la force électromotrice

Φ = le flux en maxwells

N = le nombre de conducteurs sur la périphérie de l'armature

n = tours par minute

a = nombre de bifurcations ou paire de branches du courant

p = nombre de paires de pôles.

On connaît toutes ces quantités sauf Φ . On connaît E d'après la mesure.

Le nombre de conducteurs N est égal à 8.664, p à 1 (dynamo bipolaire) et a à 1 paire car l'enroulement est imbriqué série.

On a d'après l'expression (1)

$$\Phi = \frac{0,1265 \times 1 \times 60 \times 10^8}{8664 \times 2400 \times 1} = 36,1 \text{ maxwells}$$

Le chiffre 0,1265 représente la valeur de E en volts pour 2.430 tours par minute. Cherchons la valeur moyenne du flux pour les vitesses différentes. Les valeurs du flux doivent être égales pour toutes les vitesses mais on ne peut pas éviter de petite erreur pendant

les mesures ; pour cela nous avons fait les calculs suivants :

Φ	pour 2 100 t. / m.	= 34,6 maxwells
Φ	» 2 430 t. / m.	= 36,1 »
Φ	» 2 800 t. / m.	= 36,1 »
Φ	» 3 100 t. / m.	= 35,5 »
Φ	» 3 300 t. / m.	= 36,8 »
Φ_m	moyen	= 35,8 maxwells.

L'origine de cette erreur est dans la mesure de la force électromotrice. Dans cette mesure les sources d'erreur étaient dans la lecture de la position du spot et dans la mesure du nombre de tours qui devait être faite simultanément. La plus grande erreur est 2,24 % faite pendant la mesure du potentiel à 2.100 tours par minute. Dans les autres mesures l'ordre de grandeur de l'erreur est 0,84 %.

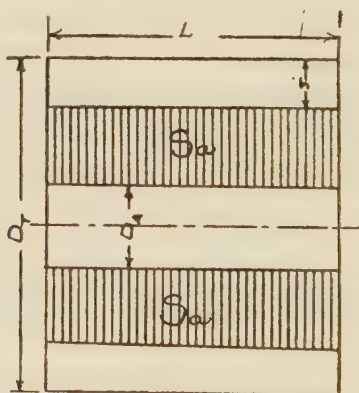


Fig. 29. — Coupe axiale de l'induit.

Maintenant on peut calculer la valeur de l'induction B d'après l'expression

$$\Phi = 2S_a B$$

d où

$$B = \frac{\Phi}{2S_a}.$$

S_a représente la section du passage du flux dans les tôles. Le chiffre 2 dans l'expression provient de ce que le flux émanant d'un pôle se divise dans l'induit en deux parties. La figure 29 représente la coupe axiale de l'induit, S_a étant les sections utiles au passage du flux.

$$S_a = L_f \left(\frac{D_T - D_A}{2} - h \right) \quad (1).$$

$L_f = 64$ mm. = longueur occupée par les tôles.

L_f = longueur totale — longueur occupée par l'isolant entre les tôles.

$D_T = 81$ mm. = diamètre extérieur des tôles.

$D_A = 20$ mm. = diamètre intérieur.

$h = 12,5$ mm. = profondeur des rainures.

On a alors

$$\begin{aligned} S_a &= 64 \left(\frac{81 - 20}{2} - 12,5 \right) \\ &= 1\,152 \text{ mm}^2 = 11,52 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

D'après la relation

$$B = \frac{\Phi_m}{2S_a}$$

Φ_m étant la valeur moyenne du flux

nous avons

$$B = \frac{35,8}{2 \times 11,52} = 1,53 \text{ gauss.}$$

La valeur de l'induction dans l'intérieur des tôles par

(1) BARBILLION et BERGEON, *Les Machines Dynamos à courant continu*, chap. IX, p. 345.

composante horizontale du champ terrestre est donc égale à 1,53 gauss ou 7,8 fois plus grande que le champ inducteur.

11. Il est très intéressant de calculer la valeur du facteur démagnétisant du noyau de la génératrice en fonction des valeurs de l'induction B et du champ extérieur H_0 . Dans le calcul nous supposons que le champ démagnétisant est le même en tous les points du noyau. Par l'effet seul du champ extérieur H_0 , on obtiendrait une certaine aimantation I_0 , mais les masses magnétiques libres produisent à l'intérieur du noyau un champ H_i dont la direction est opposée à celle du champ extérieur H_0 . L'apparition du champ H_i produit une action démagnétisante et le résultat est que l'aimantation I est plus petite que I_0 . On a la valeur de N donnée par l'expression ⁽¹⁾

$$(1) \quad N = - \frac{H_i}{I}$$

$$(2) \quad I = KH$$

$$(3) \quad H = H_0 - H_i$$

$$(4) \quad B = \mu H = \mu(H_0 - H_i)$$

H = champ résultant à l'intérieur du noyau.

K = susceptibilité du noyau.

μ = perméabilité du noyau.

Les expressions (2) et (3) nous donnent

$$(5) \quad H_i = H_0 - \frac{I}{K}.$$

⁽¹⁾ CH. MAURAIN, *Le Magnétisme du Fer*, chap. I, p. 20 ; O. CHWONSON, *Traité de Physique*, Vol. IV, chap. VIII, p. 833.

On obtient d'après les expressions $\frac{4\pi}{N} (1)_{\frac{x}{2}}$ et (5) et en introduisant $K = \frac{\mu - 1}{4\pi}$

$$(6) \quad H_i = \frac{N(\mu - 1)H_0}{4\pi + N(\mu - 1)}.$$

En comparant l'expression (6) à l'expression (4) on a

$$B = \frac{4\pi\mu}{4\pi + N(\mu - 1)} H_0$$

d'où

$$N = \frac{4\pi\mu H_0 - 4\pi B}{\mu B - B}$$

mais μ étant très grand on peut négliger les termes $(-4\pi B)$ et $(-B)$ et finalement on a

$$N = \frac{4\pi H_0}{B} = \frac{4\pi \times 0,196}{1,53} = 1,62.$$

Dans ce calcul de la valeur de N , l'action magnétique du courant dans les conducteurs de l'armature est négligée. La réaction d'induit affaiblit en plus le champ produit par l'inducteur et par conséquent la valeur de N comprend en plus de la démagnétisation à l'intérieur du noyau, la démagnétisation due à la réaction d'induit. Dans l'emploi normal de l'appareil, la réaction d'induit est nulle, car la génératrice marche à vide et c'est seulement la démagnétisation du noyau par lui-même qui nous intéresse. Nous avons dans ce cas particulier l'ordre de grandeur du facteur démagnétisant d'un noyau de mumétal ayant la forme d'un anneau avec une section rectangulaire (voir fig. 29) soumis à l'action du champ terrestre.

12. Expériences de longue durée. — Avec ce dernier appareil nous avons amélioré les conditions du nettoyage et du graissage du collecteur pour permettre une observation prolongée. Un moteur plus puissant a été employé pour qu'il marche plus de 24 heures sans arrêt et sans échauffement excessif. Nous avons pris les précautions d'éviter toutes les interruptions possibles une fois que l'appareil est mis en marche.

Pour ces expériences les brosses B (fig. 23) ont été employées pour le nettoyage du collecteur. Un graissage régulier du collecteur est effectué par deux mèches qui conduisent l'huile très légère d'un réservoir. On faisait tourner la génératrice et l'on donnait aux balais un certain calage. Avec une certaine vitesse par exemple 1.500 tours par minute, on notait la déviation du galvanomètre. On réglait la pression des balais jusqu'à ce qu'on ait obtenu la plus grande déviation pour une certaine vitesse. Le réglage de la pression est très important car avec une pression excessive, le collecteur et les balais chauffent rapidement et par conséquent l'oxyde se forme et alors le courant diminue. Lorsque la pression est moindre la déviation oscille d'un côté à l'autre. Enfin le frottement des brosses sur le collecteur doit être assez fort pour enlever l'oxyde isolant sur celui-ci. La pression des brosses sur le collecteur doit être plus ou moins égale à celle des balais. On peut faire ces réglages pendant quelques minutes de marche.

Les courbes dans la figure 30 montrent la variation de l'intensité pour les observations continues pendant plus de vingt-quatre heures. La courbe BB représente une

observation continue pendant 27 heures. On faisait la lecture chaque heure. La ligne droite sans les points correspond à un intervalle de temps pendant lequel on s'est arrêté de noter l'observation horaire, mais

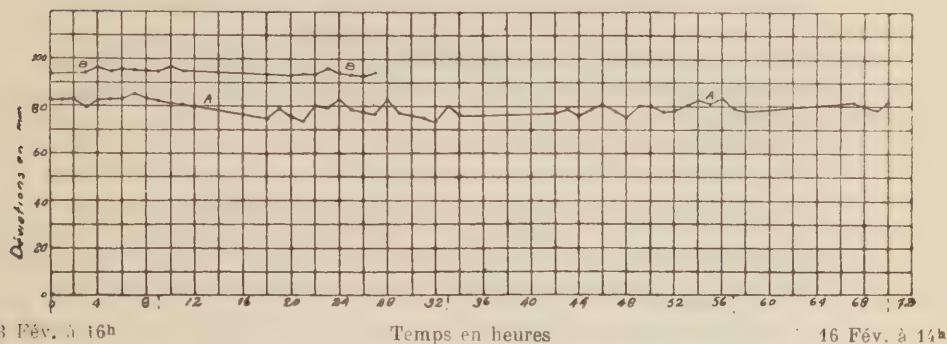


Fig. 30. — Courbes d'observations de longue durée.

l'expérience continuait encore. La courbe AA représente une expérience continue pendant 70 heures. Comme on le voit d'après la courbe, l'expérience a été commencée dans l'après-midi du 13 février et terminée dans l'après-midi du 16 février. Les parties droites représentent comme nous l'avons signalé, l'intervalle du temps pendant lequel on ne notait pas la déviation horaire à partir de 2 heures jusqu'à 9 heures de matin. L'irrégularité des courbes est attribuée à la variation de vitesse du moteur. Ces expériences ont été faites avec les balais en charbon dur de qualité très fine. Des expériences ont été faites aussi avec les balais en platine et en argent pour 24 heures sans la disparition du courant. En comparant les résultats obtenus avec ces trois types de balais, nous avons constaté que le courant était le plus constant avec

les balais en charbon. Dans ces expériences le collecteur a été lubrifié avec de l'huile de vaseline très légère pour empêcher l'échauffement et pour faciliter le nettoyage du collecteur par la brosse.

Avec ces résultats nous croyons avoir trouvé l'explication du phénomène de la disparition du courant et les dispositions nécessaires pour rendre le compas à induction fiable.

13. Signalons en passant un autre phénomène curieux observé, qui peut donner une erreur si l'on touche l'appareil pendant l'expérience. Nous avons observé que si l'on touche n'importe quelle partie de l'appareil avec les doigts ou des pièces conductrices, on voit une déviation brusque du galvanomètre à gauche ; puis elle revient à sa position normale. Lorsqu'on supprime une des connexions du galvanomètre et que l'on touche l'appareil ensuite on observe aussi la déviation brusque à gauche. Le même phénomène est observé même quand les deux connexions au galvanomètre sont supprimées, si ces connexions ne sont pas placées très loin de l'appareil.

14. Pour supprimer ce phénomène perturbateur on doit relier l'appareil au sol. Ce doit être un phénomène électrostatique qui se produit par le frottement dans l'appareil. Une autre chose curieuse est le fait que lorsqu'on renverse les connexions au galvanomètre, la déviation est toujours à gauche. En changeant le sens de rotation de la génératrice, on ne change pas la direc-

tion de la déviation. Un appareil monté dans un avion doit être relié à la masse de celui-ci pour éviter ce phénomène lorsqu'on touche la manivelle du transmetteur en changeant le cap.

15. Galvanomètre convenable à bord. — Nous n'entrons pas dans les détails de la construction d'un galvanomètre, mais nous allons exposer en quelques mots les qualités requises d'un galvanomètre convenable à bord d'un avion. Il doit être d'une sensibilité telle que lorsque le pilote dévie d'un degré ou d'une fraction de degré de son cap suivi, l'aiguille doit le lui indiquer. Pour une génératrice donnée il doit être le plus sensible possible compatible avec la puissance de la génératrice. Il doit être léger et en même temps robuste pour qu'il puisse résister aux vibrations. Dans sa construction il faut envisager l'effet des vibrations et des accélérations rapides des avions. Il est très important que l'amortissement soit fort, c'est-à-dire plus grand que l'amortissement critique. Pour rendre le moindre possible l'effet des accélérations il est très important que le moment d'inertie de la partie mobile soit petit. Le choix du fil de torsion étant limité par la sensibilité désirée et par la puissance de la génératrice, on a seulement deux facteurs que l'on peut faire varier pour arriver aux conditions requises. On peut faire varier le moment d'inertie et par conséquent la période qui est proportionnelle à la racine carrée du moment d'inertie. Lorsqu'on diminue la valeur du moment d'inertie de la partie mobile, l'amortissement augmente et l'effet des accélérations est moindre. On peut augmenter aussi l'amortissement du

galvanomètre par l'addition de minces lames d'aluminium au cadre mobile, pour augmenter la résistance de l'air. L'effet des vibrations et des accélérations sur la partie mobile sera moindre car la résistance de l'air produit un couple rigoureusement proportionnel à la vitesse angulaire si le mouvement du cadre est lent et au carré de la vitesse si le mouvement est rapide. Enfin il est préférable de monter le galvanomètre sur un matelas de crin ou de feutre destiné à absorber les chocs et les vibrations.

16. Effet des mouvements et des accélérations sur l'induit. — Dans la pratique il faut que l'induit soit suspendu à la cardan. L'induit tournant à une vitesse de l'ordre de 2.400 tours par minute est une véritable gyroscope, et étant suspendu à la cardan, il reste toujours vertical car un couple considérable doit agir pendant un temps considérable pour produire un déplacement appréciable de son axe de sa position normale. Dans ces conditions les effets du roulis, du tangage et des accélérations seront négligeables.

17. La compensation. — Un autre avantage de ce compas est dans sa compensation. Il permet de placer la génératrice loin du moteur d'avion et des autres masses magnétiques perturbatrices et par conséquent la compensation est facile à établir. Il est préférable de loger la génératrice dans la queue et si cette partie du fuselage est en matériel non-magnétique la compensation n'est pas nécessaire. Si au contraire la compensa-

tion est nécessaire on peut le compenser avec des aimants comme un compas ordinaire. Nous ne discutons pas ici le principe de la compensation et nous citons ici parmi les plus importantes études sur la compensation du compas celles de M. Dunoyer ⁽¹⁾, Archibald Smith ⁽²⁾, Poisson ⁽³⁾ et Airy ⁽⁴⁾.

⁽¹⁾ L. DUNOYER, *Etude sur le compas de la Marine et leurs méthodes de Compensation*, Thèse. 1909.

⁽²⁾ A. SMITH, *Admiralty Manual*, 1862.

⁽³⁾ POISSON, *Mémoires de l'Institut*, t. V, 1824.

⁽⁴⁾ G. AIRY, *Philosophical Transactions*, 1839, 1865.

CHAPITRE VIII

RÉSUMÉ ET CONCLUSION

1. Dans ce travail nous sommes arrivés aux conclusions suivantes :

a) La cause de la disparition du courant de la génératrice n'est pas due aux mauvaises connexions, ni aux phénomènes thermo-électriques, ni aux phénomènes de polarisation, ni aux changements chimiques ou physiques dans le système dû au passage du courant électrique ;

b) L'origine de la disparition du courant est absolument indépendante des actions du courant électrique dans le circuit car comme nous l'avons exposé, le phénomène se produit même lorsque le circuit est ouvert ;

c) La disparition du courant est un phénomène très compliqué dans lequel plusieurs facteurs entrent en jeu comme nous l'avons démontré ;

d) Avec notre dispositif de nettoyage du collecteur et de graissage régulier, notre appareil peut marcher 70 heures ou même plus sans arrêt et sans disparition

du courant. Notre appareil est prêt à faire une démonstration de longue durée ;

e) Le système des deux collecteurs possède l'avantage de permettre la réalisation d'un grand nombre de sections ou de bobines sans agrandir le diamètre du collecteur ; en ayant le plus grand nombre de sections pour un certain nombre des conducteurs on diminue l'effet de l'induction mutuelle des sections en court circuit et l'effet de dissymétrie accidentelle dans le bobinage. Ces deux facteurs peuvent varier la position de zéro du millivoltmètre lorsque la vitesse de rotation varie et par conséquent une erreur se produit dans l'indication du millivoltmètre. Un autre arrangement du collecteur comme nous l'avons exposé peut concourir avec la brosse à assurer le bon fonctionnement de l'appareil ;

f) En employant le mumétal comme noyau de la génératrice on augmente la puissance de celle-ci. Nous avons obtenu avec notre petite génératrice de 75 millimètres de diamètre extérieur et 56 millimètres de diamètre intérieur de bobines 125 millivolts et 700 microampères à une vitesse normale de 2.400 tours par minute. Le poids du cuivre est seulement 366 grammes. Avec un noyau mumétal nous avons obtenu une valeur d'induction dans le noyau 7, 8 fois plus grande que la composante horizontale du champ terrestre ;

g) L'effet d'hystérésis est négligeable avec un noyau de mumétal car la perte par hystérésis est seulement égal à $\frac{1}{10}$ de celle du fer doux suédois de la meilleure qua-

lité. Même avec un noyau de fer doux, l'hystérésis n'empêche pas le bon fonctionnement de l'appareil, comme nous l'avons montré.

h) L'on peut avoir un régime de vitesse de rotation sensiblement constant quel que soit l'avion ou quelle que soit la vitesse de cet avion avec un régulateur de vitesse à force centrifuge. On peut employer aussi une hélice à pas variable. Une vitesse de rotation excessive peut rendre le contact des balais et du collecteur mauvais et en plus peut produire un échauffement de l'appareil.

i) Pour rendre l'effet de la composante verticale du champ terrestre nulle quelle que soit la position de l'avion, il faut que la génératrice soit suspendue à la cardan. La génératrice produisant une action gyroscopique maintient toujours sa position verticale et un couple considérable doit agir pendant un temps assez long pour déplacer son axe de sa position normale. Le galvanomètre doit avoir un fort amortissement et peu d'inertie. Il est préférable d'ajouter des ailettes en aluminium à la partie mobile, pour augmenter l'amortissement mécanique.

j) On ne doit pas oublier de relier l'appareil à la masse de l'avion car comme nous l'avons démontré un phénomène électrostatique étranger perturbateur peut donner une erreur.

k) De ces expériences nombreuses résulte la loi suivante :

Tous les contacts — tournants ou glissants — entre métaux, ou métal et charbon, ou métal et mercure et

plus généralement entre des conducteurs quelconques peuvent, par leur frottement mécanique continu, produire une résistance soit cinétique soit permanente au passage du courant électrique.

En terminant ce travail, je dois exprimer ma grande reconnaissance à M. Ch. Maurain, Membre de l'Institut, Doyen de la Faculté des Sciences, Directeur de l'Institut de Physique du Globe, qui m'a donné son aide et ses conseils particulièrement précieux et m'a accueilli dans son laboratoire. Je dois exprimer aussi ma reconnaissance à M. L. Dunoyer, Professeur à la Sorbonne, Secrétaire Général de la Société Française de Physique pour ses conseils très précieux et à M. et M^{me} Labrouste qui m'ont donné leurs conseils dans la préparation de la deuxième thèse. Je remercie le Service Technique de l'Aéronautique pour son aide à la réalisation de la construction de la génératrice avec noyau de mumétal. Je remercie aussi MM. Ed. Salles et Eblé qui m'ont prodigué leurs encouragements avec bienveillance et mes camarades d'étude MM. Grenet, Debrach et Rougerie dont les suggestions ont été les bienvenues.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
INTRODUCTION	1

CHAPITRE PREMIER

COMPAS A INDUCTION

1. Principe	5
2. Inducteur terrestre comme inclinomètre	5
3. Inducteur terrestre comme compas.....	6
4. Compas électromagnétique Dunoyer.....	7
5. Appareil Dunoyer perfectionné	8
6. Compas à Induction Titterington.....	9
7. Fonctionnement de ce compas.....	11
8. Avantage de ce type de compas.....	12
9. Autre modèle du compas Titterington.....	12
10. Compas à Induction Heyl-Briggs.....	13
11. Remarques sur les différents types.....	15

CHAPITRE II

THÉORIE ET DESCRIPTION DU MONTAGE

1. Conditions à étudier.....	16
2. Description du montage.....	16
3. Principe du compas à induction.....	18
4. Théorie fondamentale.....	18
5. Conditions de son emploi.....	22
6. Exactitude de la formule.....	24

CHAPITRE III

DESCRIPTION DE L'APPAREIL CONSTRUIT

	Pages
1. L'appareil construit	29
2. La génératrice	29
3. Précautions à prendre dans la construction	31
4. La construction de la bobine	33
5. Le collecteur	34
6. Le petit moteur électrique	34
7. Le transmetteur de cap	34
8. L'indicateur de cap	37

CHAPITRE IV

MÉTHODES DE MESURE ET RÉSULTATS

1. Méthode de mesure	38
2. L'observation faite	38
3. L'effet du noyau magnétique	42
4. Sensibilité de l'appareil	42
5. Sensibilité du compas Pioneer	43
6. L'effet des champs magnétiques créés par les lignes électriques de tranways et de Métropolitain à Paris. .	43

CHAPITRE V

EFFETS D'UN NOYAU MAGNÉTIQUE

1. L'emploi du noyau magnétique	44
2. Inconvénients d'un noyau	44
3. Les courants de Foucault	45
4. Le trainage magnétique	46
5. L'hystérésis	46
6. Le Calcul de l'angle d'avance hystérétique	47

CHAPITRE VI

PHÉNOMÈNE DE LA DISPARITION DU COURANT

1. Nature du phénomène perturbateur	49
2. Caractéristiques générales du phénomène	50

	Pages
3. Observations avec des balais en charbon et en argent ,	51
4. Observations avec d'autres balais	54
5. Expérience avec un galvanomètre différentiel.....	55
6. Deux hypothèses sur la disparition du courant (a) variation des forces électromotrices (b) augmenta- tion de la résistance totale	57
7. Etude de l'effet thermo-électrique	58
8. Etude des phénomènes polarisation.	58
9. Etude de la variation de résistance totale.....	60
10. Observation lorsque le collecteur est touché.....	61
11. Hypothèse de court-circuit entre lames.....	63
12. Mesure de résistance.....	64
13. Reproduction du phénomène par la roue tournante..	65
14. Expérience avec contact en mercure.....	68
15. Expérience avec circuit ouvert.....	70
16. Nature de la résistance.....	70
17. Examen microscopique du collecteur et des balais....	71
18. Caractéristiques de la résistance.....	73
19. Expérience avec le collecteur et balais en argent.....	73
20. Expérience avec les contacts en platine.....	74
21. Etude microscopique de la vibration des balais.....	75
22. Dispositif pour supprimer la vibration aux contacts..	77
23. Nature compliquée du phénomène.....	79
24. Lois de contacts tournant ou glissants.....	80
25. Expérience avec la tension de 4 volts.....	80
26. Dispositif pour éviter la disparition du courant.....	81

CHAPITRE VII

INDUIT AVEC TOLES EN MUMÉTAL. OBSERVATIONS DE DURÉE

1. Propriétés du mumétal.....	85
2. Traitement thermique des tôles.....	86
3. Construction de la génératrice.....	86
4. L'enroulement	89
5. Les collecteurs et la commutation.....	90
6. Procédure de mesure.....	93
7. L'emploi du régulateur de vitesse.....	93
8. Mesure de l'intensité et du potentiel.....	95
9. Comparaison avec le compas Pioneer. Sensibilité.....	97
10. Calcul de la valeur de l'induction B.....	99

	Pages
11. Calcul du facteur démagnétisant.....	102
12. Expériences de longue durée. Observation de 70 heures	104
13. Phénomène électrostatique perturbateur.....	106
14. Nécessité de relier l'appareil au sol.....	106
15. Galvanomètre convenable à bord.....	107
16. Effets des mouvements et des accélérations sur la gé- nératrice	108
17. Compensation	108

CHAPITRE VIII

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

1. Résumé et Conclusions.....	110
Remerciements	113

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTE

APPLICATION DE LA SÉISMOLOGIE
A L'ÉTUDE DU NOYAU CENTRAL DE LA TERRE

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 22 Mai 1930.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

CH. MAURAIN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

S. CHARLÉTY.

IMPRIMERIE DES PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE,
Paris-Saint-Amand. — 27-5-1930.
